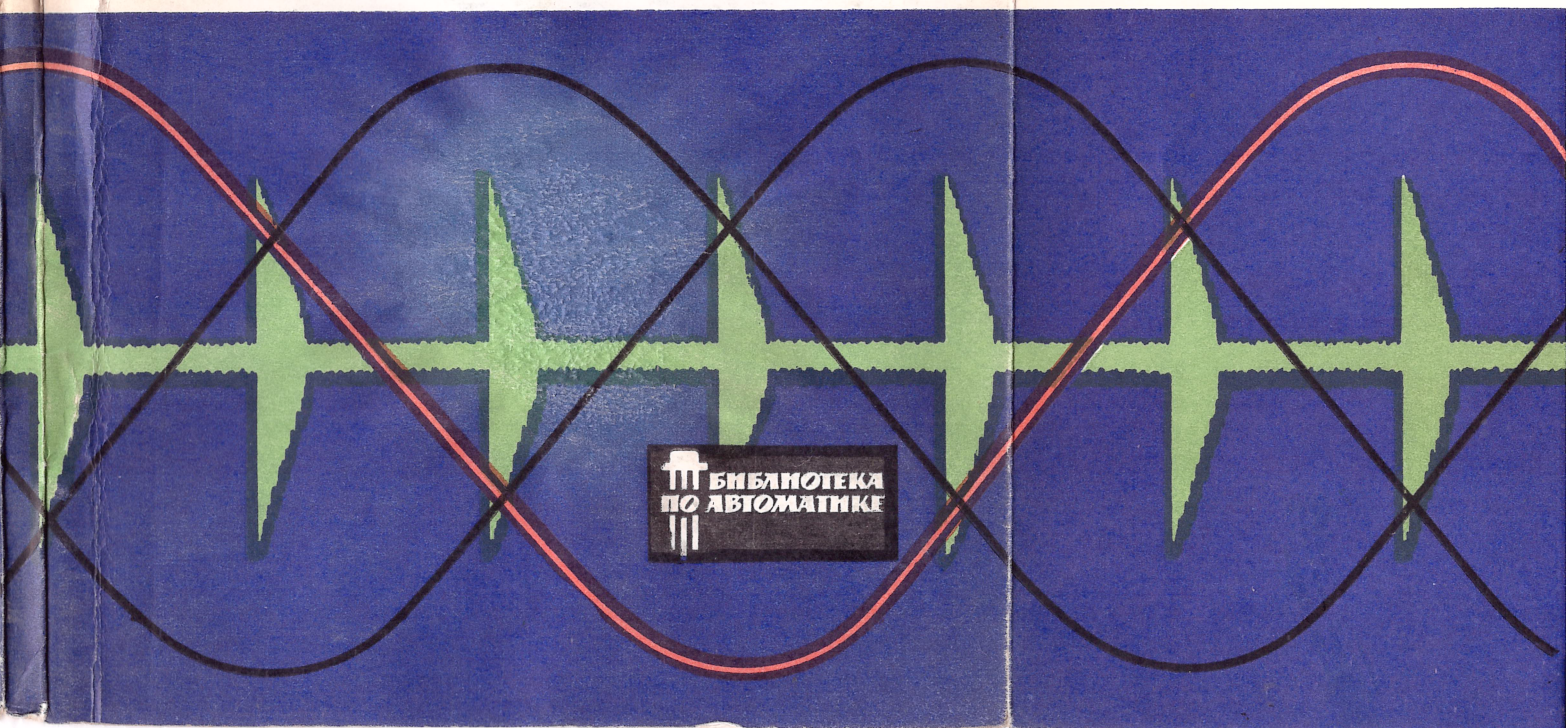
621.391
С-20

В. В. САРАПКИН

ПОМЕХИ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДЛЯ КАНАЛОВ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

В книге рассмотрены мешающие высокочастотные колебания в распределительных электрических сетях 0,4—35кв, происходящие от линейных изоляторов, трансформаторов, генераторов электрических станций и радиопередатчиков. Обнаружен характерный спектр частот, свойственный нормальному и поврежденному состоянию изоляции в трехфазных установках. Доказана природа происхождения комбинационных составляющих в линиях высокого напряжения. Рассмотрены помехи в виде модулированных колебаний на частотах единиц и десятков килогерц. Предложена методика отыскания мощного очага помех, препятствующего работе каналов связи.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой аппаратуры, проектированием и эксплуатацией высокочастотных каналов.



621391
С-20

В. В. САРАПКИН

ПОМЕХИ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДЛЯ КАНАЛОВ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

473349

К
Техническая библиотека
Киевский
авиационный завод
621.391

Издательство „Техніка“
Киев — 1969

10 ИЮЛ 19741
-2613
ПЕРЕВІРЕНО

6Ф1.2+6П2.15
С20

УДК 621.391.8

Помехи в распределительных электрических сетях для каналов телефонной связи и телемеханики. В. В. Сарапкин, «Техніка», 1969, 136 стр.

Рассмотрены мешающие высокочастотные колебания в распределительных электрических сетях 0,4—35 *кв*, происходящие от линейных изоляторов, трансформаторов, генераторов электрических станций и радиопередатчиков.
Обнаружен характерный спектр частот, свойственный нормальному и поврежденному состоянию изоляции в трехфазных установках. Доказана природа происхождения комбинационных составляющих в линиях высокого напряжения. Рассмотрены помехи в виде модулированных колебаний на частотах единиц и десятков килогерц. Предложена методика отыскания мощного очага помех, препятствующего работе каналов связи.
Предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся разработкой аппаратуры, проектированием и эксплуатацией высокочастотных каналов.

Табл. 8, илл. 54, библ. 77.

Рецензент *Катков Ф. А.*, докт. техн. наук

Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи

3-3-13
49-69М

КИЕВСКАЯ КНИЖНАЯ ФАБРИКА № 1

ПРЕДИСЛОВИЕ

За последние годы техника высокочастотной связи по линиям высокого напряжения развивается ускоренными темпами. Если в довоенный период для этой цели использовались, в основном, линии электропередачи 110 и 220 *кв* крупных энергосистем, то в настоящее время используются линии распределительных электрических сетей. Возросший интерес к их использованию вызван тем обстоятельством, что распределительные сети, как правило, соединяют между собой рассредоточенные объекты, нуждающиеся в средствах контроля и управления.

Пятнадцатилетний опыт эксплуатации каналов связи по проводам сельских распределительных линий 6, 10, 22 и 35 *кв* утвердил их в качестве основного средства диспетчерских сообщений в системе сельского электроснабжения, где работает около 1000 таких каналов. Устройства телефонной связи и телемеханики по распределительным сетям в широких масштабах начинают использоваться на нефтепромыслах, в горнодобывающих карьерах, на объектах лесоразработок и торфопредприятий, рудниках, городском хозяйстве, системах орошения и других отраслях.

При внедрении устройств связи в различные отрасли народного хозяйства главное внимание специалистов уделяется вопросам разработки соответствующей аппаратуры передачи информации. Однако разработка и совершенствование аппаратуры не могут осуществляться успешно без детального изучения высокочастотных характеристик электрических линий. В частности,

опыт показывает недостаточную надежность высокочастотных каналов, обусловленную наличием в линии мешающих колебаний (помех). Не зная параметров мешающих колебаний, характерных для распределительных сетей, оказалось весьма трудно создать надежные помехоустойчивые каналы телеуправления.

Настоящая работа имеет целью восполнить в некоторой мере имеющийся пробел знаний о мешающих колебаниях в распределительных сетях. Основное внимание уделено помехам от постояннодействующих источников.

Большая часть исследований выполнена под руководством докт. техн. наук Б. В. Смирнова, которому автор рад выразить искреннюю благодарность.

Автор выражает глубокую признательность докт. техн. наук Ф. А. Каткову, ценные замечания которого при рецензировании рукописи способствовали улучшению книги.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: *Киев, 4, Пушкинская, 28, издательство «Техніка»*.

I. ПОМЕХИ В ЛИНИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

1. ОСОБЕННОСТИ ПОМЕХ

В линиях высокого напряжения сочетаются различные по своей природе источники помех: коронирование, электрические газовые разряды в изоляции, гармоники промышленного напряжения, колебания от коммутационных переключений, переходных процессов, неплотных контактов и т. д. Интенсивность действия источников помех каждого вида неодинакова и существенно меняется с течением времени, в зависимости от состояния погоды и других причин. Генерируемые ими напряжения отличаются не только величиной амплитуды, но и формой кривой напряжения, частотой следования импульсов, периодичностью повторения групп различной полярности и т. д. Составляющие от каждого источника помех имеют определенную структуру спектра и преобладают в определенном диапазоне частот.

Одновременное существование источников колебаний различной природы и интенсивности с накладывающимися спектрами создает исключительную сложность в исследовании помех на высоковольтных линиях. В результате указанных особенностей обычные измерительные приборы неприменимы для оценки величины напряжения помех. Применяемые для этой цели измерители помех различных фирм не имеют одинаковой полосы пропускания, запаса на перегрузку и постоянных времени заряда и разряда детекторной цепи и индикаторного прибора, вследствие чего снижается ценность опубликованных результатов измерения при их использовании другими исследователями.

Указанные выше трудности явились главным препятствием при изучении помех в линиях высокого напряжения.

Несмотря на достаточно продолжительный период накопления материала в этой области до сих пор не сделано попыток обобщить накопленные сведения. Такое положение усугублялось отсутствием однообразной методики

исследования, единого стандарта на параметры измерителей помех различных стран, несогласованностью критериев оценки помех, а также отсутствием координации изучения.

Признавая важность проблемы изучения помех, Комитет № 14 Международной Конференции по электрическим системам (СИГРЭ) в 1953 г. предпринял организованное исследование помех на силовых линиях [11, 43]. Однако основные вопросы этой проблемы до сих пор остались неразрешенными. Теоретические основы процесса образования помех на силовых линиях не разработаны.

В значительно большей степени это относится к распределительным сетям, где помехи изучены очень мало. Имеющиеся данные о мешающих колебаниях в линиях высших напряжений нельзя формально распространить на сети 0,4—35 *кв*, которые свободны от наиболее мощного источника помех — коронирования. Вследствие этого преемственность достигнутых успехов для изучения помех в сетях 0,4—35 *кв* определяется весьма малой степенью.

В конце двадцатых годов было замечено сильное мешающее действие помех на радиоприем [73, 74 и др.]. Это привлекло серьезное внимание как радиоспециалистов, так и энергетиков. В лабораторных условиях доказали, что каждый фарфоровый изолятор является источником высокочастотных колебаний [53, 66, 76 и др]. Одним из главных очагов этих колебаний является место контакта линейного и вязочного провода с фарфором изолятора. Для устранения этого очага помех предложен способ нанесения на головку изолятора глазури из окиси меди, которая затем химически восстанавливалась и облуживалась. Неменьший эффект получен от опыта с покрытием шейки изолятора асфальтовой краской. Указанные мероприятия в сочетании с незаземленной опорой привели к исчезающе малой величине помех от изоляторов [53].

С точки зрения специалистов каждый изолятор представляется высокочастотным генератором, нагруженным с обеих сторон волновым сопротивлением линии $Z_л$ и имеющим внутреннее сопротивление r_i приблизительно равным емкостному сопротивлению собственной емкости изолятора [44—48, 72 и др]. Волновые сопротивления линии, включенные по обе стороны от рассматриваемого изолятора, составляют нагрузку генератора, равную $\frac{Z_л}{2}$. Так как для одного под-

весного изолятора, обладающего собственной емкостью около 50 *пф*, при частоте 2 *Мгц* внутреннее сопротивление составляет 10 000 *ом*, а внешняя нагрузка $\frac{Z_л}{2} \approx 250$ *ом*, то последней можно пренебречь. Поэтому высокочастотный ток ограничивается внутренним сопротивлением генератора, зависящим от величины собственной емкости изолятора. Существование поля радиопомех около высоковольтной линии объясняется волнообразным распределением тока и напряжения в линии, которое наступает при разрядах в воздушных прослойках на переходных местах между изолятором и металлом.

С помощью переносного радиоприемника, снабженного рамочной антенной, были обнаружены четко выраженные и вполне ограниченные максимумы шумов около каждой опоры линии [57, 58, 60, 61]. Однако под теми опорами, где в изоляторах имелись волосяные трещины на внешней поверхности, внутренние трещины, пористость фарфора, раковины или загрязнение наружной поверхности, был замечен значительно больший уровень помех [44]. Из 100% обследованных изоляторов, дававших повышенные помехи, причиной оказались следующие дефекты [62, 63, 64]:

	%
трещины	69,7
пористость глазури	11,4
пористость керамики	8,5
воздушные прослойки в керамике	7,6
сильное загрязнение поверхности	2,8

Помехи, являющиеся неизбежным спутником работы высоковольтных линий, разделяют на «нормальные» и «аномальные» [48]. «Нормальными» считаются такие величины помех, которые свойственны вполне исправному состоянию изоляции линии. «Аномальными» считаются помехи, значительно возросшие из-за неисправного состояния изоляции или других дефектов в силовом оборудовании.

По данным американских исследований [42], помехи в линиях высокого напряжения, в основном, имеют импульсный характер. Частота повторения импульсов на выходе приемника меняется от 60 до 180 *1/сек* *. На заземляющем дросселе устройств присоединения наблюдается более или

* В США частота промышленного напряжения равна 60 *гц* в отличие от европейских стран, принявших частоту 50 *гц*.

менее регулярное появление всплесков помех за каждые полпериода напряжения на каждой фазе линии. В диапазоне высоких частот основное значение имеют помехи, обусловленные наличием в линии высокого напряжения, вызывающего коронирование проводов и частичные разряды на изоляторах [8, 9, 10]. Помехи, свойственные высоковольтным линиям, имеют хаотический характер, относятся к типу гладких, однако во времени они распределены неравномерно, пульсируя в такт с напряжением промышленной частоты [8, 43, 69]. Наблюдаемые на экране электронного осциллографа всплески напряжения помех через 1/150 *сек* совпадают с положительными максимумами высокого напряжения между проводами линии [18]. Всплески с наибольшими амплитудами соответствуют той фазе, к которой подключен осциллограф, а с меньшими — обусловлены соседними фазами (рис. 1). Длительность всплеска обычно составляет около 15% периода напряжения промышленной частоты.

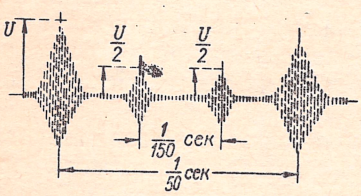


Рис. 1. Характер напряжения помех в коронирующих линиях высокого напряжения.

Кроме коронирования и частичных разрядов на изоляторах линии, помехи возникают также и в воздушных включениях, находящихся в высоковольтной изоляции трансформатора [67]. Величина помех, генерируемых трансформаторами, еще не установлена, поэтому ее значимость в общем уровне неизвестна.

За последние годы установлено, что одновременно с гладкими помехами от короны, показанными на рис. 1, в линиях высокого напряжения регулярно возникают значительные по амплитуде импульсы от частичных разрядов на изоляторах с частотой повторения серий, приближающейся к 300 *1/сек* [75]. Существование помех значительной величины обнаружено и при малых напряжениях, когда коронирование отсутствует [43, 65]. Низковольтные сети и распределительные линии со штыревыми изоляторами в некоторых работах признаются потенциальными источниками бóльшего уровня помех, чем высоковольтные линии с подвесными изоляторами [40]. При этом замечено, что разряды на изоляторах являются источниками колебаний зна-

чительно большей интенсивности, чем коронный разряд [68]. Ниже будет показано, что в распределительных электрических сетях, не имеющих коронирования, помехи определяются, главным образом, частичными разрядами в изоляторах и имеют особую структуру спектра колебаний.

2. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯТОРАХ

Процесс образования помех от частичных разрядов изучен значительно глубже остальных явлений, вызывающих электрические помехи в линиях высокого напряжения.

Возникновение частичного разряда на поверхности диэлектрика в общих чертах показано К. С. Архангельским и А. Н. Власовым [3]. Эквивалентная электрическая схема диэлектрика, поясняющая возникновение частичного разряда на его поверхности, приведена на рис. 2. Объем изоляции, где появляется частичный разряд, изображается в виде некоторой емкости C_2, шунтируемой искровым промежутком F, а C_1 — емкость слоя, ограничивающего дальнейшее распространение разряда. Емкости C_1 и C_2 соединены параллельно с емкостью C_3 остальной части изоляции и включены на напряжение источника питания U через сопротивление цепи Z. Частичный разряд, «закорачивающий» емкость C_2, сопровождается некоторым спадом напряжения на электродах системы. Вслед за разрядом емкость системы будет дозаряжаться до напряжения, соответствующего стационарному режиму. Заряд происходит через сопротивление цепи Z и может носить апериодический или колебательный характер. Напряжение на изоляции при частичном разряде слагается из напряжения стационарного режима и наложенного на него напряжения нестационарного режима —«волн частичного разряда», обусловленных падением напряжения на изоляции в момент разряда и последующим его восстановлением. При питании системы от

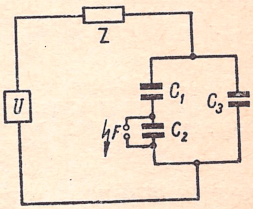


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема диэлектрика, поясняющая возникновение частичного разряда на его поверхности.

источника переменного тока частичные разряды будут повторяться через каждые полпериода основной частоты. С повышением напряжения число частичных разрядов за время одного периода может увеличиваться. Экспериментально проведены исследования повторяющихся разрядов в схемах с последовательной и параллельной емкостями и дополнительными сопротивлениями в зарядной и разрядной цепи с искровым промежутком [52].

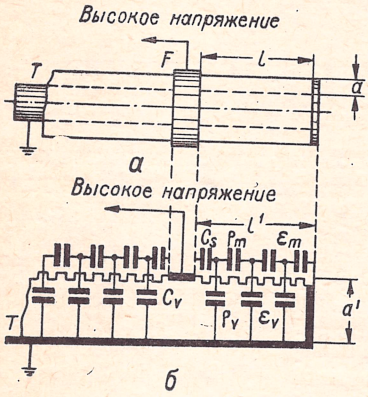


Рис. 3. Высоковольтный диэлектрик (*а*) и его эквивалентная электрическая схема (*б*).

Возможность возникновения частичного разряда доказана теоретическим путем [22]. Схема замещения диэлектрика в виде цепочки поверхностных емкостей и поверхностных и объемных сопротивлений показана на рис. 3. Для всех видов поверхностных разрядов при переменном токе величина напряжения, при которой появляются разряды, определяется выражением

$$U = E_0 \sqrt{\frac{k\varepsilon_m a}{\varepsilon_v}}\, th\left(\sqrt{\frac{\varepsilon_v}{k\varepsilon_m a}}\, l\right),$$

где E_0 — вполне определенное значение напряженности поля, при которой начинаются частичные разряды; k — некоторая постоянная, зависящая от свойств поверхности диэлектрика; a, l — соответственно толщина и длина образца изоляции; ε_m — диэлектрическая проницаемость среды, окружающей изоляцию; ε_v — диэлектрическая проницаемость изоляции.

Это выражение показывает следующие необходимые условия, при которых возникают разряды: 1) явление разряда на поверхности чистого сухого изолятора может возникнуть в том случае, если на каком-нибудь участке изолятора по тем или другим причинам напряженность поля превосходит некоторую вполне определенную величину E_0; 2) напряжение поверхностных разрядов понижается или с возрастанием диэлектрической проницаемости изоляции

ε_v, или с уменьшением толщины изоляции, или с понижением диэлектрической проницаемости среды ε_m, стремясь в каждом отдельном случае к некоторой постоянной величине; 3) поверхностные разряды могут возникнуть только при достаточно больших значениях удельного поверхностного и объемного сопротивления диэлектрика, когда $\rho_s > 10^{12}$ и $\rho_v > 10^{13}$, а также при высоком значении удельного объемного сопротивления среды $\rho_m > 10^{13}$. При столь больших величинах удельных сопротивлений материала токи проводимости не влияют на распределение напряженности поля, поэтому поверхностные разряды, главным образом, определяются емкостными процессами.

При рассмотрении причин образования частичного разряда на высоковольтных изоляторах особое внимание уделяется вопросу неравномерного распределения напряжения как на элементах гирлянд, так и на поверхности каждого изолятора. Исследованиями установлено, что неравномерность распределения напряжения возникает от двух факторов: во-первых, вследствие дополнительных емкостей изоляторов в гирлянде относительно заземленной опоры и относительно провода (изоляторы без дефектов и загрязнения); во-вторых, вследствие загрязнения наружной поверхности изоляторов [13, 15, 24 и др.]. В первом случае главной причиной неравномерного падения напряжения как на элементах гирлянды, так и вдоль поверхности отдельного изолятора является емкостный ток утечки. При этом вследствие неравномерного емкостного падения напряжения на элементах гирлянды, вызванного наличием дополнительных емкостей, наибольшее напряжение приходится на изоляторы, расположенные около провода, наименьшее — на изоляторы, находящиеся в середине гирлянды, и несколько повышенное — на изоляторы заземленного конца гирлянды на опоре. Например, в семиэлементной гирлянде изоляторов, на ближайший к проводу изолятор приходится всегда максимальное напряжение, обычно составляющее 24% от приложенного [32]. По данным фирмы Rosenthal [72], в семиэлементной гирлянде на ближайший к проводу изолятор приходится 22% приложенного напряжения U, на третий изолятор от заземленного конца — 13% (рис. 4, *а*).

Причины, вызывающие неравномерное распределение напряжения вдоль гирлянды, создают благоприятные условия для возникновения разрядных явлений на более нагруженных изоляторах. Поэтому нижний изолятор гирлянды,

находящийся под максимальным напряжением, может генерировать наибольшее напряжение высокочастотных помех. Измеренная величина напряжения U высокочастотных помех на каждом элементе гирлянды (рис. 4, *б*) [49] достаточно точно воспроизводит характер распределения высокого напряжения на тех же элементах гирлянды (рис. 4, *а*). Эти данные совпадают с результатами последующих аналогичных измерений в других странах.

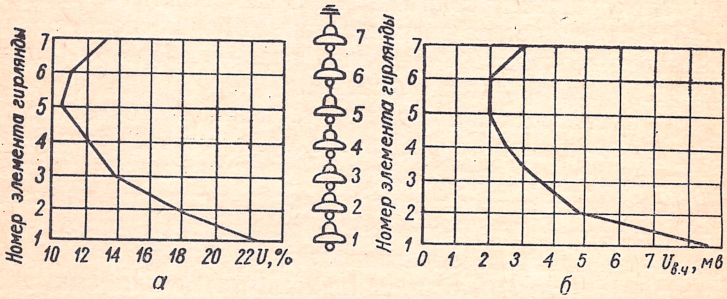


Рис. 4. Кривые распределения напряжения промышленной частоты вдоль гирлянды чистых изоляторов в процентах к приложенному (*а*) и величины высокочастотного напряжения на каждом элементе гирлянды (*б*).

Распределение высокого напряжения вдоль поверхности отдельно взятого изолятора, укрепленного вместе с проводом обычным методом, имеет такой же характер, как и вдоль гирлянды, составленной из подвесных изоляторов. У отдельного изолятора также наблюдается повышенное напряжение на поверхности, прилегающей к проводу, и меньшее напряжение в средней части его поверхности. Некоторое выравнивание распределения напряжения у стержневого изолятора достигается с помощью арматуры и путем сгущения ребер [32].

Экспериментально установлено, что напряжение вдоль поверхности отдельного изолятора распределяется чрезвычайно неравномерно. Так, у обычного подвесного изолятора 93% напряжения приходится на $^1/_4$ длины поверхности (рис. 5, *а*) и распределяется, главным образом, вокруг мест соприкосновения диэлектрика с металлическими элементами [72]. Для сравнения на том же рисунке пунктирной прямой показано идеальное распределение напряжения вдоль поверхности изолятора. Следовательно, конструкция изоляторов столь несовершенна, что на основную часть их по-

верхности, составляющую $^3/_4$ ее длины, приходится всего лишь 7% приложенного напряжения.

Более равномерное распределение напряжения вдоль поверхности получено у двухъюбочного подвесного изолятора с массивным фарфоровым сердечником типа Vollkernform (рис. 5, *б*). Такие изоляторы генерируют значительно меньшее напряжение помех по сравнению с обычными многоюбочными, имеющими металлизированную головку и опор-

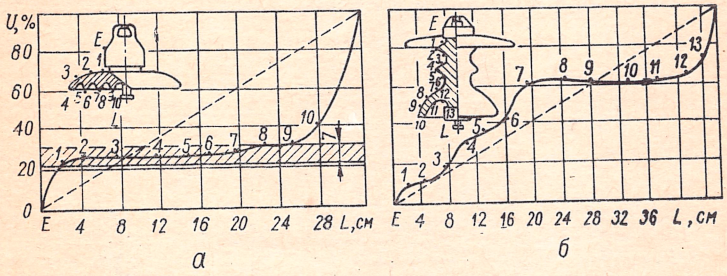


Рис. 5. Кривые распределения напряжения вдоль поверхности чистого сухого изолятора (от основания заземленного колпака *E* до металлического стержня *L*).

ное отверстие [58]. Например, при замене обычных трехъюбочных изоляторов на участке линии длиной 350 *м* изоляторами с сердечником Vollkernform (соответствующего напряжения) высокочастотное напряжение помех уменьшилось в 20 раз по отношению к ранее измерявшейся величине [59].

Рассмотренная выше неравномерность распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов, а также по поверхности каждого отдельного изолятора является основным фактором, способствующим возникновению частичных разрядов. По кривым распределения напряжения на рис. 5 видно, что очаги разрядов возникают прежде всего в местах соприкосновения фарфора с металлической арматурой. Именно здесь существуют высокие градиенты напряжения, играющие решающую роль в ионизации воздуха и образовании газовых разрядов.

Все вышеизложенное о неравномерном распределении напряжения на изоляторах рассматривалось при условии их чистой и неповрежденной поверхности, когда емкостный ток утечки изолятора является преобладающим. У загрязненных изоляторов в сырую погоду распределение напряжения вдоль гирлянды изменяется (рис. 6) [47].

Распределение напряжения при этом определяется активным током утечки, значительно превосходящим емкостный ток. Загрязненная поверхность изоляторов при увлажнении очень часто приводит к перекрытию [15, 32, 47, 50].

В сухом состоянии корка загрязнения почти не влияет на распределение напряжения вдоль поверхности изолятора, так как она является диэлектриком. При увлажнении загрязненного изолятора туманом, росой или

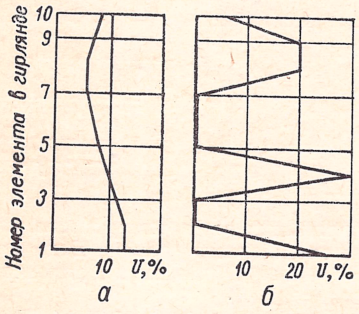


Рис. 6. Кривые распределения напряжения по элементам загрязненной гирлянды:
при влажности атмосферы 42% (*а*) и 95% (*б*).

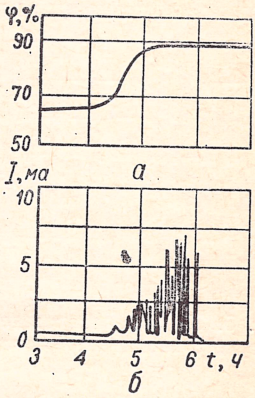


Рис. 7. Кривая изменения во времени влажности среды (*а*) и величины тока утечки загрязненной гирлянды изоляторов (*б*).

мелким дождем, на его поверхности появляются участки с неодинаковой проводимостью, обусловливающие распределение напряжения вдоль поверхности изолятора. Вследствие неравномерной поверхностной проводимости и неодинаковой мощности рассеивания скорее подсушиваются участки с наибольшим поверхностным сопротивлением для тока утечки. Если на коротком участке подсыхающей поверхности изолятора возникает столь большое падение напряжения (напряженность поля в данном месте достаточна для ионизации прилегающего воздуха), то происходит местный газовый разряд. В результате образующихся разрядов в цепи тока утечки появляются острые импульсы тока помех (рис. 7). Величина их достигает 5 *ма* при нормальном состоянии изоляции и 80—100 *ма* при увлажнении [48]. Эксперименты показывают, что частичные разряды на изоляторах носят форму тлею-

щего газового разряда [48, 50, 71 и др.]. Возникновение частичных разрядов внутри воздушных включений в изоляции достаточно подробно изложено в работах [12, 33]. На основании результатов исследований Ю. М. Волокобинского можно сделать следующие выводы о закономерностях генерируемой высокочастотной энергии при разрядах внутри воздушных включений: 1) при разряде газа в полости выделяющаяся энергия возрастает в третьей степени от размера полости вдоль направления поля, следовательно, легче всего газ ионизируется в крупных порах; 2) энергия разрядов в полости возрастает пропорционально квадрату напряженности поля, при которой происходит ионизация газа в поре; 3) выделяющаяся в поре энергия пропорциональна частоте переменного напряжения и числу разрядов за каждый период напряжения.

3. ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЧАСТИЧНЫЙ РАЗРЯД В ОТДЕЛЬНОМ ИЗОЛЯТОРЕ

Процесс возникновения частичного разряда связан с емкостной конструкцией самого изолятора [71]. В эквивалентной электрической схеме изолятора, изображенной на рис. 8, *в*, собственная емкость C включена между линейным проводом и землей. Процесс образования частичных разрядов рассматривается при различных дефектах, в частности, при наличии трещины в корпусе или глазури, а также при различных видах воздушного включения внутри изолятора.

Место трещины в дефектном изоляторе (рис. 8, *б*) условно изображено посредством искроразрядного промежутка F (очага возникновения газового разряда с определенным напряжением зажигания U_z). Сопротивление в цепи разряда R_e принимается постоянным и настолько большим, что изменяющимся сопротивлением искрового промежутка можно пренебречь. При подключении схемы к источнику постоянного напряжения U_0 через сопротивление R (индуктивность в подводящих проводах не учитывается) емкость изолятора C заряжается по закону (рис. 8, *в*):

$$U_C = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right),$$

где $\tau_a = RC$ — постоянная времени заряда.

Как только между электродами искроразрядного промежутка достигнет определенное напряжение зажигания U_z, произойдет разряд. У пораженного (дефектного) изолятора емкость C будет шунтироваться значительно меньшим по величине сопротивлением самого изолятора R_v, и величина напряжения на конденсаторе устанавливается в зависимости от соотношения сопротивлений R и R_v, которая вообще может не достигнуть величины U_z при данном U. После

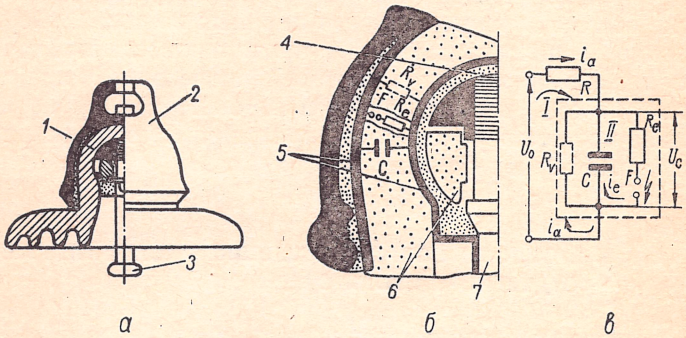


Рис. 8. Подвесной изолятор:

а — внешний вид; *б* — схематично изображенная трещина в головке фарфорового корпуса; *в* — эквивалентная электрическая схема; 1 — головка фарфорового корпуса; 2 — колпак; 3 — стержень; 4 — замазка (полупроводник); 5 — электроды емкости C (арматура и замазка учитывается как одно целое); 6 — фарфор; 7 — арматура.

зажигания искрового промежутка емкость C разряжается с постоянной времени $\tau_0 = R_e C$ по закону:

$$U_c = U_0 e^{-\frac{t}{\tau_e}}$$

до тех пор, пока снижение напряжения достигнет величины напряжения погасания газового разряда U_L.

После прекращения разряда емкость C дозаряжается и процесс повторяется в виде автоколебаний, показанных на рис. 9, *в*. Токи, протекающие при заряде и разряде емкости, определяют уровень высокочастотных помех и могут раскрыть сущность явлений, происходящих при разрядах. Следует различать две цепи тока:

1) зарядного

$$i_a = \frac{U_0 - U_L}{R} e^{-\frac{t}{\tau_a}};$$

2) разрядного

$$i_e = \frac{U_z}{R_e} e^{-\frac{t}{\tau_a}}.$$

Изменение общего тока (зарядного и разрядного) можно было бы проследить на экране электронного осциллографа посредством подключения его параллельно измерительному сопротивлению R_2 (рис. 9, *а*). Процесс имел бы характер, изображенный на рис. 9, *г*. Однако такое включение осуществить невозможно. Практически доступной для изучения

47349

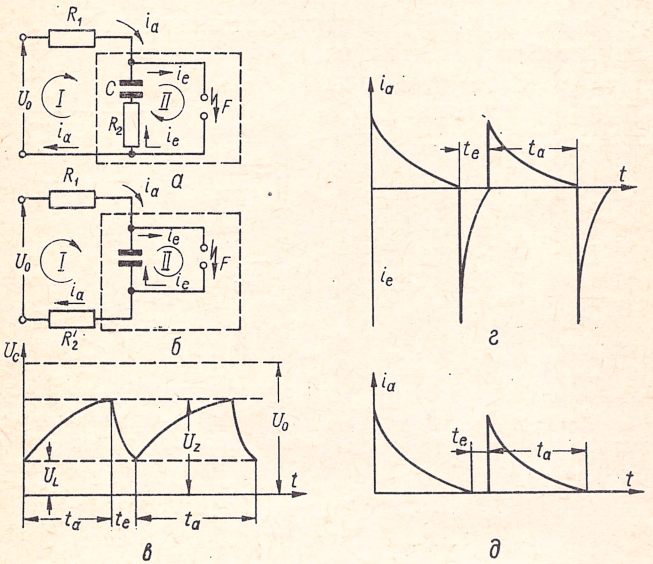


Рис. 9. Эквивалентные электрические схемы дефектного изолятора (*а*, *б*), изменение напряжения на емкости C (*в*), тока в измерительных сопротивлениях R_2 (*г*) и R_2' (*д*) при автоколебательных разрядах.

высокочастотных помех, генерируемых изоляторами, является схема, показанная на рис. 9, *б*, где путем подключения осциллографа к сопротивлению R_2' возможно проследить только лишь ток заряда конденсатора i_a (рис. 9, *д*) и невозможно проследить разрядный ток i_e.

Процессы изменения напряжения и токов на рис. 9, *в*, *г*, *д* [71] идеализированы. В действительности импульс разрядного тока i_e появляется не в момент, когда ток подзаряда

Техническая библиотека
Киевский
авиационный завод

емкости i_a равен нулю, а несколько раньше. Зарядный ток i_a также появляется раньше, чем это показано на рис. 9, *г*. Повторяющиеся разряды в виде автоколебаний могут появляться при следующих условиях:

1) напряжение источника U_0 должно быть больше или равно напряжению зажигания U_z, т. е. $U_0 \geqslant U_z$;

2) постоянная времени разряда τ_e должна быть малой по сравнению с постоянной времени зарядной цепи τ_a, т. е. $\tau_a > \tau_e$; $RC > R_eC$; $R > R_e$.

Рассмотренный выше дефектный изолятор, изображенный в виде воздушного канала с газоразрядным промежутком, является простейшим для понимания примером. В действительности в изоляторах имеются местные трещины, воздушные включения и, кроме собственной емкости изолятора, может участвовать более сложная система емкостей. Например, у изолятора с воздушным включением (раковиной) возможны безэлектродные разряды. Их возникновение в газовом включении облегчено резким отличием диэлектрической постоянной газа ($\varepsilon_{возд} = 1$) от фарфора ($\varepsilon_{фарф} \approx 5$). Случай разряда в воздушном включении изолятора изображен на рис. 10 эквивалентной схемой замещения с частичными емкостями и условно показан в виде искроразрядного промежутка, заключенного в прямоугольник. Дефектный изолятор в составе гирлянды также представляет собой частичную емкость с газоразрядным промежутком, расположенную внутри цепочки емкостей остальных изоляторов гирлянды. Рассматривая разряд на частичной емкости в

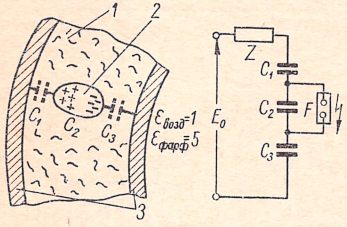


Рис. 10. Изолятор с воздушным включением и его эквивалентная электрическая схема:
1 — фарфор; 2 — воздушный пузырь; 3 — металлическая арматура.

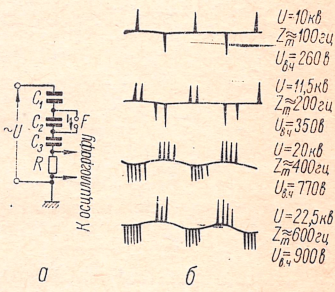


Рис. 11. Схема для исследования процесса частичных разрядов в изоляторе (*а*) и осциллограммы зарядных импульсов, накладывающихся на 50-периодную кривую (*б*).

простейшем случае, когда емкость C_3 отсутствует, можно получить закономерность изменения импульса напряжения помех:

$$U_{\text{имп}} = \frac{ZC_1}{\tau'_e} U_{C_2} \left(1 - e^{-\frac{t}{ZC_1}}\right),$$

если принять время изменения напряжения на емкости C_2 как постоянную времени разряда. Это выражение показывает, что амплитуда напряжения импульса пропорциональна скачку напряжения на разряжающейся емкости C_2 и отношению постоянной времени заряда $\tau_a = ZC_1$ к постоянной времени разряда τ'_e.

Частота автоколебательного процесса при атмосферных условиях, зависящая от времени деионизации воздуха (порядка 10^{-5} *сек*), ограничена приблизительно величиной 10^4 *гц*.

При переменном напряжении качественная сторона происходящего процесса, в основном, та же. Но так как напряжение источника периодически изменяется от нуля до максимума, то разряды возможны только за некоторую часть полуволны, когда значение переменного напряжения достигает и превосходит напряжение зажигания U_z. Процесс частичных разрядов на отдельном изоляторе при переменном напряжении имитировался схемой, показанной на рис. 11, *а*. Частичная емкость C_2, разряжающаяся посредством искрового промежутка F, определяется емкостью среднего изолятора трехэлементной гирлянды. Осциллограммы зарядных импульсов показывают следующие характерные черты процесса частичных разрядов на отдельно взятом изоляторе:

а) за каждую полуволну высокого напряжения в последовательной цепи тока питания возникают зарядные импульсы тока помех той же полярности, что и полуволна напряжения;

б) каждый частичный разряд сопровождается одним импульсом помех, обладающим микросекундной длительностью;

в) с возрастанием подводимого напряжения число разрядов за каждую полуволну увеличивается;

г) при значительном увеличении подводимого напряжения процесс разряда становится менее регулярным (циклич-

ным), при этом число разрядов за полуволны различной полярности напряжения становится неодинаковым;

д) при неизменном потенциале зажигания газоразрядного элемента амплитудное напряжение зарядных импульсов растет быстрее по сравнению с увеличением приложенного напряжения.

В лабораторных условиях установлена значимость различных дефектов изолятора по величине генерируемого

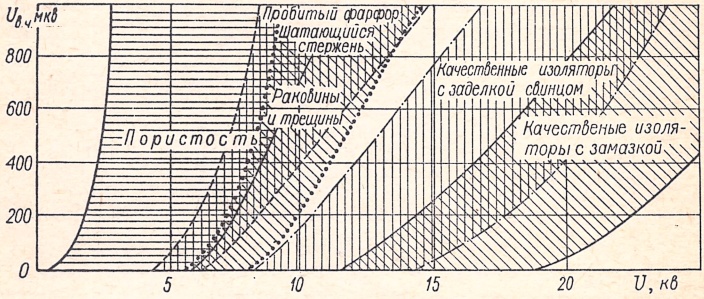


Рис. 12. Высокочастотное напряжение помех, создаваемое подвесными изоляторами с различными дефектами в зависимости от величины приложенного напряжения.

напряжения помех [71]. Наибольшее напряжение помех возникает у пористых изоляторов, несколько меньше — у изоляторов с пробитым фарфором и шатающимся стержнем, и еще меньшее — у изоляторов с раковинами и трещинами (рис. 12). Любой высоковольтный изолятор с дефектами или без них является генератором автоколебательных разрядов, а образующиеся при этом импульсы зарядного тока и бегущие в линии волны напряжения порождают синусоидальные колебания всех частот, т. е. сплошной спектр.

Как уже указывалось выше, в литературных источниках не обнаружено теоретических работ по исследованию помех от системы изоляторов трехфазной линии высокого напряжения. Сделаны лишь первые попытки объяснить механизм образования частичных разрядов на отдельно взятом изоляторе.

II. ПОМЕХИ ОТ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯТОРАХ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

4. СОВОКУПНОСТЬ ИМПУЛЬСОВ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ЧАСТИЧНЫЕ РАЗРЯДЫ В ИЗОЛЯТОРАХ ЛИНИИ

Условия образования частичных разрядов на изоляторах трехфазной линии очень сильно отличаются от лабораторных условий. В лабораторных опытах, имитировавших частичные разряды на отдельном изоляторе, имелся единственный «газоразрядный элемент» с относительно стабильной величиной потенциала зажигания и элементы с неизменными параметрами. Поэтому возникавшие в этой цепи зарядные импульсы были относительно стабильны по амплитуде и частоте следования.

Трехфазная линия в отличие от лабораторной установки представляет собой сложное сочетание различных «газоразрядных элементов» и всевозможных атмосферных условий. Характерные черты рассматриваемого процесса в трехфазной линии определяются следующими факторами.

Линейные изоляторы, являющиеся, как известно, потенциальными очагами газовых разрядов, распределены вдоль всей высоковольтной сети. Большое количество «газоразрядных элементов» на изоляторах линии физически объединено в три фазные группы. Элементы каждой такой группы, которые параллельно включаются между объединяющими их проводом и землей, подвергаются действию соответствующего фазного напряжения.

Полярность зарядных импульсов, возникающих от частичных разрядов на элементах данной фазной группы, соответствует полярности высокого напряжения.

Возникновение частичных разрядов на изоляторах рассматриваемой группы наиболее вероятно в отрезки времени, соответствующие максимальным значениям фазного напряжения, так как при максимумах линейного напряжения на изоляторы каждой из обеих фазных групп приходится всего лишь половина величины линейного напряжения.

Каждый «газоразрядный элемент», обладая той или иной величиной потенциала зажигания, может вступать в действие только лишь при достижении определенной величины напряжения между проводом и землей. Величина напряжения зажигания «газоразрядных элементов» непрерывно

изменяется в зависимости от температуры, влажности и давления окружающего воздуха. Атмосферные условия, в конечном итоге, определяют количество действующих очагов частичного разряда на изоляторах воздушной электрической сети.

Определим, исходя из указанных выше положений, основные черты совокупности зарядных импульсов в трехфазной сети при различных атмосферных условиях. Литературные данные показывают, что сырая погода вызывает на воздушных линиях, свободных от коронирования, резкое увеличение уровня помех. На этом основании можно полагать, что атмосферные условия выступают главным фактором, определяющим величину потенциала зажигания «газоразрядных элементов». Многочисленные наблюдения исследователей [13, 32, 46 и др.] подтвердили принадлежность этих помех к частичным разрядам на изоляторах. Не вдаваясь в подробности многостороннего влияния температуры, влажности и давления окружающей среды на процессы образования частичных разрядов на изоляторах, будем в дальнейшем оперировать напряжением зажигания «газоразрядных элементов» U_z, величина которого определяется атмосферными условиями.

Покажем с помощью векторной диаграммы влияние различной величины напряжения зажигания на характер совокупности возникающих при этом зарядных импульсов в линии. Минимальным напряжением зажигания принимается тот наименьший при данных условиях уровень напряжения между проводом и землей, при котором начинает вступать в действие хотя бы один из очагов частичного разряда на изоляторах фазной группы. Пусть векторы фазных напряжений U_A, U_B и U_C на рис. 13, *а* вращаются относительно точки O с угловой скоростью $\omega = \frac{2\pi}{T_{50}}$. Если проекции на неподвижную ось MN векторов фазных напряжений достигают значения

$$U_{z\,\text{мин}} = U_{\text{ф.макс}} \cos \omega \frac{t_z}{2}, \qquad (1)$$

то в соответствующей группе изоляторов возникают частичные разряды, сопровождаемые зарядными импульсами в линии. Приняв в начальный момент времени положение векторов фазных напряжений, показанное на рис. 13, *а*, и условие $U_{z\,\text{мин}} < U_{\text{ф.макс}}$, нетрудно понять, что от действия

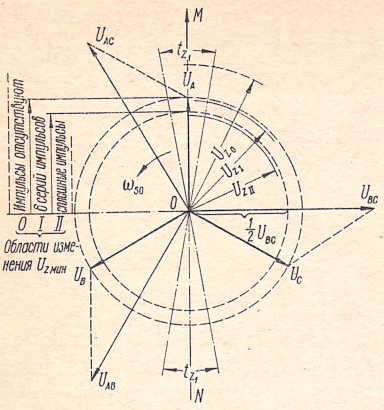
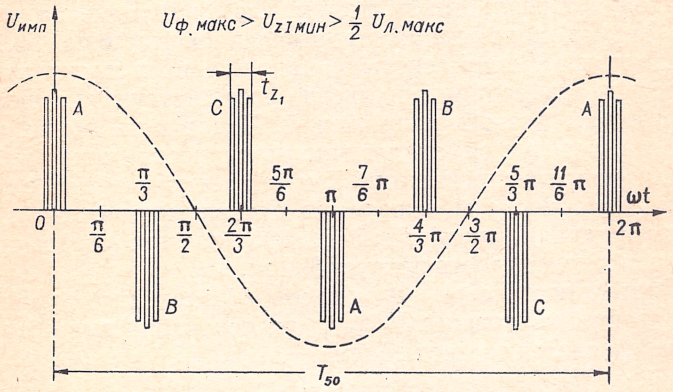
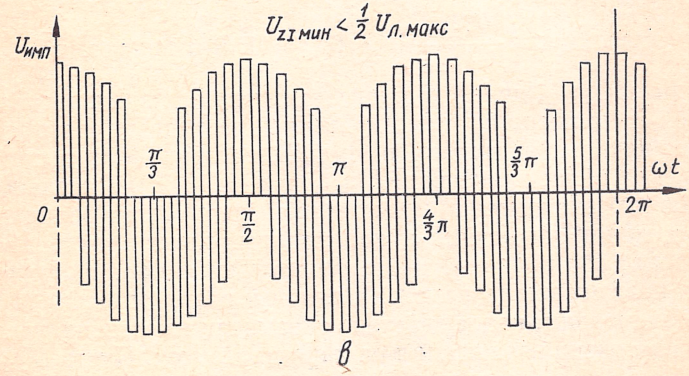


Рис. 13. К пояснению механизма образования совокупности импульсов от частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети:

а — векторная диаграмма напряжений; *б* — система импульсов от действия фазных напряжений; *в* — система импульсов от действия фазных и линейных напряжений.





фазного напряжения U_A положительной полярности в области времени, близкой к $t = 0$, в «газоразрядных элементах» фазы A происходят частичные разряды, сопровождаемые серией положительных импульсов. Через $^1/_6$ часть периода $\left(\frac{\pi}{3}\right)$ действие отрицательного напряжения фазы B вызывает серию отрицательных импульсов. Через $^1/_3$ периода $\left(\frac{2\pi}{3}\right)$ положительное напряжение фазы C вызывает серию положительных импульсов и т. д. Для упрощения рассуждений форму напряжения отдельного импульса помех принимаем прямоугольной. На рис. 13, *б* показана образующаяся в линии совокупность серий импульсов в идеальном случае, которая впоследствии по этапам усложняется и переходит к реальным условиям. Следовательно, за каждый период напряжения промышленной частоты T_{50} от действия трехфазной системы напряжений в линии появляется шесть серий импульсов, соответствующих шести максимумам фазных напряжений. Полярность групп импульсов чередуется аналогично полярности максимумов фазных напряжений в линии. Так как серии импульсов следуют синхронно с максимумами фазных напряжений, то в симметричной трехфазной системе частота следования групп импульсов соответствует 300 *гц*.

Длительность серии импульсов t_z зависит от уровня напряжения зажигания $U_{z\,\text{мин}}$ и на основании выражения (1) определяется соотношением

$$\omega t_z = 2 \arccos\left(\frac{U_{z\,\text{мин}}}{U_{\text{ф.макс}}}\right).$$

При значениях $\left(\frac{U_{z\,\text{мин}}}{U_{\text{ф.макс}}}\right) \geqslant 1$ $t_z = 0$. Это значит, что при уровнях $U_{z\,\text{мин}}$, превосходящих амплитудное значение фазного напряжения, возникновение частичных разрядов невозможно и зарядные импульсы в линии отсутствуют (нулевая область значений $U_{z\,\text{мин}}$ на рис. 13, *а*). В реальных условиях эксплуатации высоковольтных сетей величина напряжения зажигания «газоразрядных элементов» на изоляторах, как правило, ниже амплитуды фазного напряжения, поэтому всегда имеются частичные разряды.

Рассмотрим, какое действие оказывает изменение уровня напряжения зажигания на характер помех. Пусть $U_{z\,\text{мин}}$

изменяется в границах области *I* (рис. 13, *а*), определяемой отношением

$$U_{\text{ф.макс}} \geqslant U_{z\,\text{мин}} \geqslant \frac{U_{\text{л.макс}}}{2}. \qquad (2)$$

Верхняя граница области *I*, определяемая соотношением $U_{z\,\text{мин}} = U_{\text{ф.макс}}$, является пределом возможного существования частичных разрядов. Нижняя граница этой области, определяемая равенством

$$U_{z\,\text{мин}} = \frac{1}{2} U_{\text{л.макс}},$$

характеризуется возможностью появления частичных разрядов от $^1/_2$ амплитуды линейного напряжения. Особенность рассматриваемой области значений $U_{z\,\text{мин}}$ состоит в том, что здесь проявляется действие только фазных напряжений. Изменение $U_{z\,\text{мин}}$ в границах этой области определяет характерную совокупность импульсов, состоящую из шести (за каждый период 50 *гц*) равноудаленных по времени серий импульсов чередующейся полярности (рис. 13, *б*). Длительность серий может принимать значения от 0 до $\frac{\pi}{3}$ при неизменном расстоянии между ними 0,003 (3) *сек*.

Вторая область значений $U_{z\,\text{мин}}$, обозначенная на диаграмме индексом *II*, определяется соотношением

$$U_{z\,\text{мин}} \leqslant \frac{1}{2} U_{\text{л.макс}}. \qquad (3)$$

При напряжении зажигания, равном $^1/_2$ амплитуды линейного напряжения, частичные разряды возникают в обеих фазных группах изоляторов. Следовательно, в границах области *II*, кроме шести (за период 50 *гц*) серий импульсов помех, вызванных фазными напряжениями, появляются дополнительные шесть серий импульсов от действия линейных напряжений. Начиная с верхней границы области *II*, когда

$$U_{\text{ф.макс}} \cos 30^\circ = \frac{1}{2} U_{\text{л.макс}},$$

длительность каждой серии импульсов увеличивается со значения $\frac{\pi}{3}$. Это значит, что в области *II* значений $U_{z\,\text{мин}}$ серии импульсов, не имея интервалов, следуют непрерывно (рис. 13, *в*).

Если принять во внимание тот факт, что амплитуда импульсов помех увеличивается в большей пропорции по сравнению с ростом прикладываемого напряжения (рис. 11, *б*), то на границе *I* и *II* областей можно предположить появление 12 серий импульсов помех в течение каждого периода напряжения 50 *гц*.

При рассмотрении образования частичных разрядов на изоляторах трехфазной линии было показано, что в зависимости от состояния атмосферных условий могут существовать различные совокупности импульсов. При атмосферных условиях, определяющих уровень напряжения зажигания «газоразрядных элементов» в границах области *I*, на линиях имеет место периодическое следование серий импульсов чередующейся полярности с частотой 300 *гц*. При неблагоприятных атмосферных условиях, определяющих низкий уровень напряжения зажигания (область *II*), в линии возникают сплошные помехи, состоящие из множества хаотических импульсов. На границе вышеуказанных областей можно предполагать образование 12 серий импульсов с частотой следования 600 серий в секунду при чередовании их полярности через каждые две серии [27, 30, 35, 37]. Рассмотренный выше механизм образования частичных разрядов на изоляторах отражает только качественную сторону вопроса, касающуюся характера возникающих помех. Вопросы количественных соотношений, учитывающих такие факторы, как число импульсов в серии, их амплитуду, форму, момент возникновения, а также распространение по линии, составляют предмет специального изучения и в данной работе затронуты незначительно.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСОВ ОТ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯТОРАХ

Методика и техника измерений

Применявшаяся в данной работе методика и техника измерений помех во многом заимствована из работ [9, 42]. Главное внимание авторы уделяли изучению действия помех на выходе приемника. Такая узкая постановка вопроса, предусматривающая решение частной задачи, не привела к обнаружению основных закономерностей помех как на выходе приемного устройства, так и в линии.

Методика, разработанная Я. Л. Быховским, предусматривает всестороннее изучение линейных помех и помех на выходе приемника.

В данной работе принят метод всестороннего изучения мешающих колебаний. При проведении массовых измерений

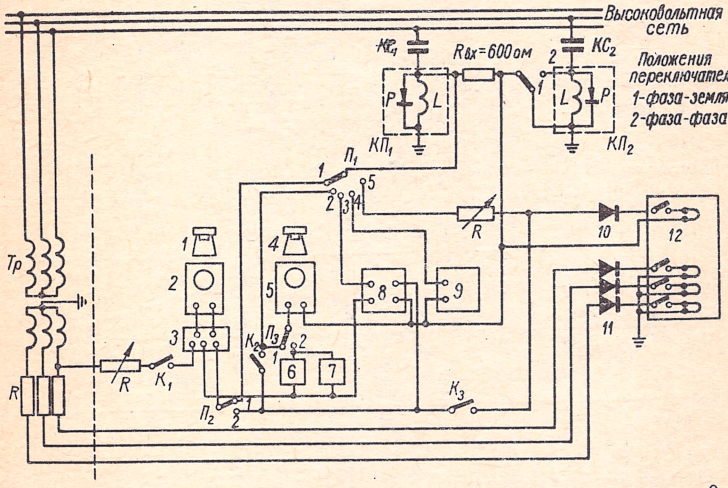


Рис. 14. Блок-схема приборов для исследования помех в сетях 0,4—35 *кв*:

1 — фотоприставка; 2 — электронный осциллограф типа ЭО-7; 3 — электронный коммутатор; 4 — фотоприставка; 5 — анализатор спектра типа АСЧХ-1; *6* — генератор типа ЗГ-10; 7 — вольтметр типа МВИ-1М; *8* — избирательный приемник «Tekade»; *9* — избирательный указатель уровня типа УУ-150-II или ИУУ-300; *10, 11* — германиевые диоды; *12* — шлейфовый осциллограф типа МПО-2; *КС* — высоковольтный конденсатор связи; *КП* — коробка присоединения.

в различных сетях основное внимание уделялось исследованию закономерностей линейных помех. Это осуществлялось методом многостороннего контролирования напряжения мешающих колебаний всеми доступными средствами, каждое из которых, обладая заранее известными недостатками, предоставляло дополнительные сведения для более полного понимания процесса.

Мешающие колебания на выходе приемника изучались в сравнительно широкой области частот, что дало возможность обнаружить различие частотной структуры помех на низких и высоких частотах.

Применявшаяся при исследованиях блок-схема приборов показана на рис. 14. Измерительная аппаратура

подключалась к линии с помощью простейших устройств присоединения, состоящих из высоковольтного конденсатора связи *КС* и коробки присоединения *КП* с заземляющим

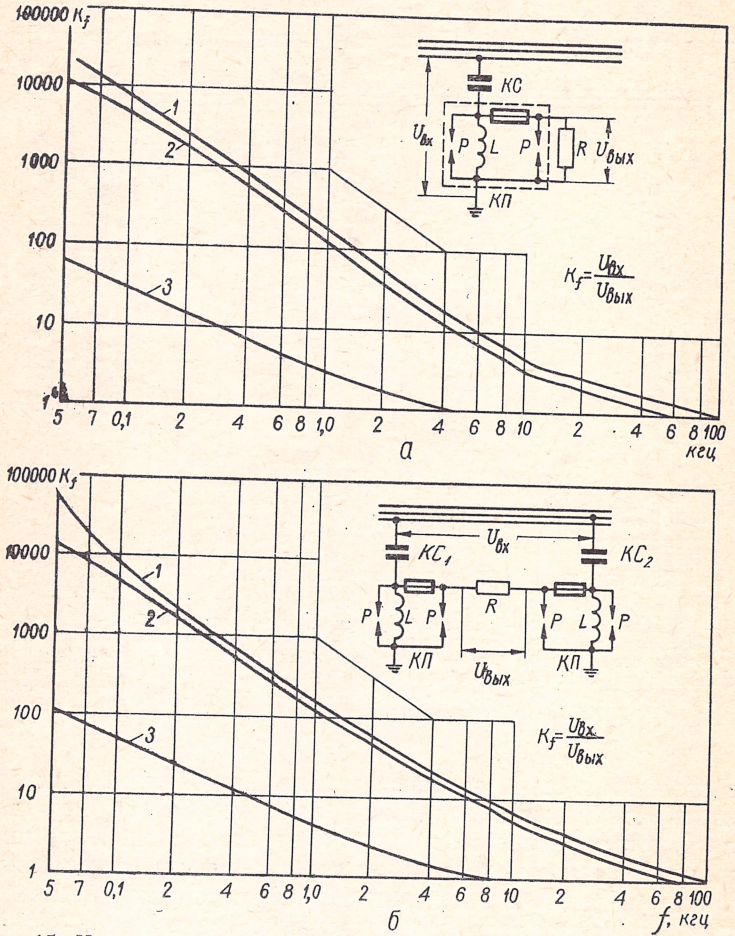


Рис. 15. Частотная характеристика затухания устройства присоединения для схемы «фаза-земля» (*а*); «фаза—фаза» (*б*):
1 — линии 35 *кв*; *2* — 6 и 10 *кв*; *3* — 0,4 *кв*.

дросселем $L = 50$ *мгн*, разрядником *Р* на 300 *в* и плавким предохранителем. Конденсаторы связи для линий 35 *кв* имели емкость 4400 *пф*, для линий 6—10 *кв* — 5000 *пф* и для линий 0,4 *кв* — 100 000 *пф*.

Частотные характеристики затухания устройств присоединения при схемах «фаза — земля» и «фаза — фаза» приведены на рис. 15. При всех измерениях применялось нагрузочное сопротивление $R = 600$ *ом*.

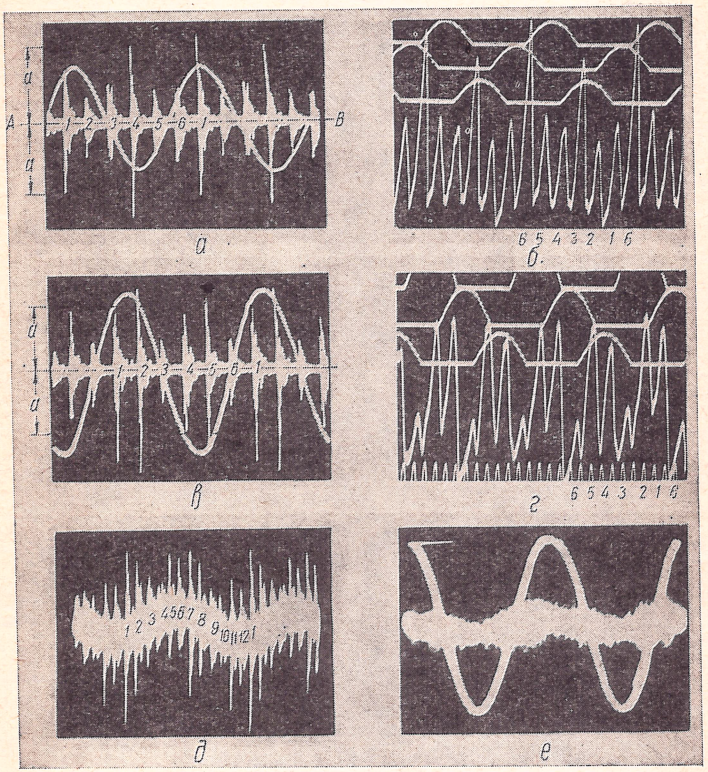


Рис. 16. Осциллограммы напряжения помех на выходе устройства присоединения 35 *кв* относительно кривой 50 *гц* при:
а, б — погоде «сухо» для схемы «фаза—земля»; *в, г* — погоде «сухо» для схемы «фаза—фаза»; *д* — тумане, росе и появлении дождя; *е* — длительной погоде «сыро».

Линейное напряжение помех изучалось четырьмя способами *.

При первом способе наблюдали и регистрировали кривую напряжения помех на заземляющем дросселе устройства

* Каждый способ более подробно рассматривается ниже.

присоединения (положение $1П_1$ и $П_2$, рис. 14). При этом с экрана электронного осциллографа *2* с помощью приставки *1* фотографировалась форма напряжения помех относительно калиброванной по амплитуде 50-периодной кривой,

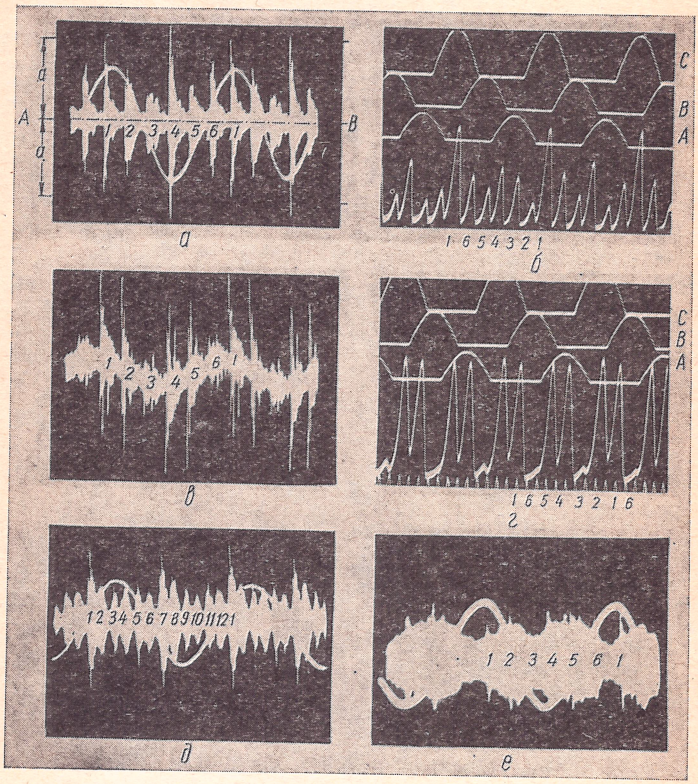


Рис. 17. Осциллограммы напряжения помех на выходе устройства присоединения 6 *кв* при:

а, б — погоде «сухо» для схемы «фаза — земля»; *в, г* — погоде «сухо» для схемы «фаза — фаза»; *д* — тумане, росе и появлении дождя; *е* — длительной погоде «сыро».

служившей одновременно и системой отсчета амплитуд, и системой отсчета времени (рис. 16, *а*). Для этого исследуемое напряжение помех и калиброванное по амплитуде напряжение 50 *гц* поочередно подавалось на вход осциллографа с помощью электронного коммутатора *3*. Указанным способом изучалась форма кривой напряжения помех на

выходе устройства присоединения, фронт нарастания и спадания всплесков, закономерности их следования, продолжительность и амплитуда.

При втором способе записывали на фотопленку среднее значение тока помех положительной полярности относи-

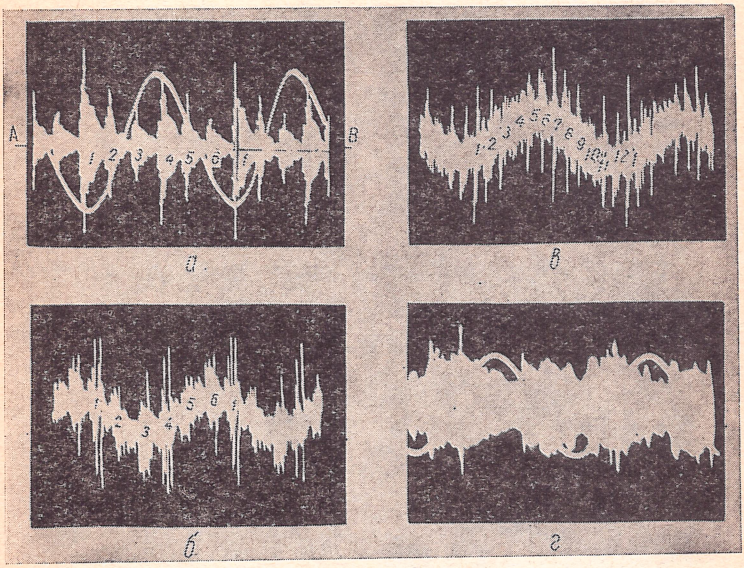


Рис. 18. Осциллограммы напряжения помех на выходе устройства присоединения 0,4 *кв* при:

а — погоде «сухо» для схемы «фаза—земля»; *б* — погоде «сухо» для схемы «фаза—фаза»; *в* — тумане для схемы «фаза—фаза»; *г* — дожде, длительной погоде «сыро».

тельно положительных полуволн трехфазной системы напряжений (рис. 16, *б*). Для этого ток помех детектировался полупроводниковым диодом 10 и записывался с помощью шлейфового осциллографа 12 (рис. 14, положение *5* $П_1$). Несмотря на значительное искажение формы кривой тока помех, такая запись, развертывая процесс во времени, дала возможность обнаружить закономерность изменения амплитуд всплесков относительно полуволн трехфазной системы напряжений в течение большого числа периодов 50 *гц*.

Третий способ заключался в исследовании отдельного всплеска напряжения помех (рис. 19, *а*, *б*, *в*). Для этого к схеме электронного осциллографа добавлен блок однократной

ждущей развертки с временем развертки, равным одному периоду 50 *гц*, и автоматическим запуском от максимального импульса помех той или другой полярности.

Четвертый способ дал возможность регистрировать натуральные импульсы помех в линии, наложенные на

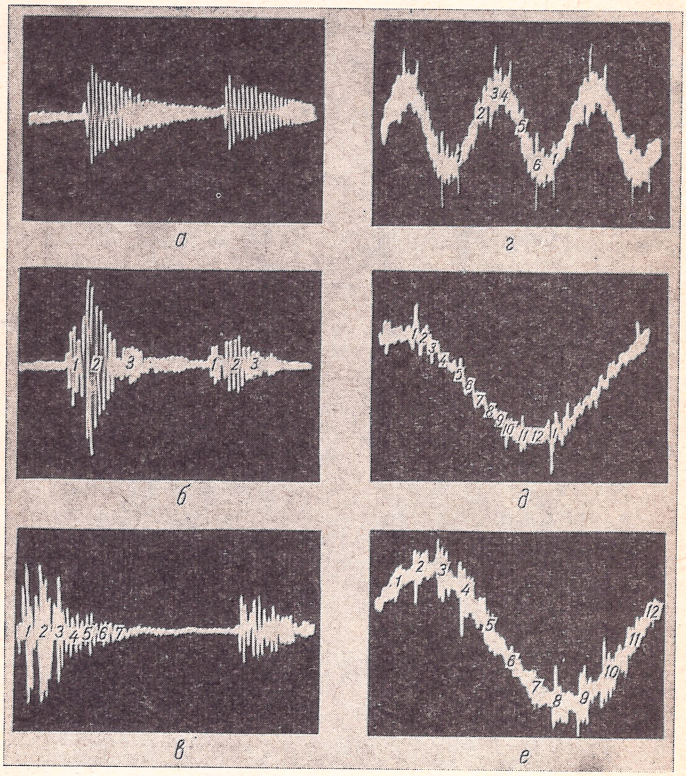


Рис. 19. Осциллограммы напряжения всплесков на выходе устройства присоединения, содержащего заземляющий дроссель (*а*, *б*, *в*) и заземляющее активное сопротивление (*г*, *д*, *е*).

50-периодную кривую фазного или линейного напряжения, в зависимости от схемы присоединения к проводам линии (рис. 19, *г*, *д*, *е*). Это осуществлялось при помощи устройств присоединения, в которых вместо заземляющего дросселя устанавливалось активное сопротивление.

Мешающие колебания на выходе приемника исследовались следующими тремя методами:

1. Осциллографированием формы кривой напряжения с выхода приемника *8* относительно принятой системы ориентировки (рис. 14, положения *3* $П_1$ и *2*$П_2$). В качестве приемника использовался избирательный указатель уровня фирмы «Tekade», выполненный по супергетеродинной схеме без автоматической регулировки усиления с ненастроенным входом и полосой пропускания $\Delta f = 1500$ *гц*. Посредством электронного коммутатора *3* ко входу осциллографа *2* подводились поочередно напряжение помех и 50-периодное напряжение, которое служило системой отсчета времени и амплитуды напряжения импульсов.

2. Фотографированием на экране анализатора спектра *5* фотоприставкой *4* амплитуды гармонических составляющих напряжения помех, подававшихся с выхода избирательного приемника *8* (рис. 14, положения *3* $П_1$ и *1*$П_3$). Анализатор типа АСЧХ-1 раскладывал сложный сигнал на отдельные составляющие, которые на экране трубки изображались в виде спектральных линий соответствующей высоты. Точное значение частоты и амплитуды составляющих определялось с помощью калибровочных спектрограмм, получаемых путем подачи на вход анализатора калибровочного напряжения от генератора *6*, амплитуда которого замерялась вольтметром *7* (рис. 14, положение *2* $П_3$).

3. Третий метод состоял в измерении уровня помех на всех частотах настройки приемника при различных условиях погоды. Измерения производились селективным указателем уровня *9* с двойным преобразованием частоты типа УУ-150-П, имеющим полосу пропускания $\Delta f = 75 \pm 25$ *гц*, или типа ИУУ-300 с полосой 1000 *гц*. Измеренный уровень помех (среднее значение) приводился к общепринятой полосе $\Delta f = 5$ *кгц* [8]

$$P_5 = P_{0,075} + \frac{1}{2} \ln \frac{5}{0,075}, \text{ неп.}$$

Влияние атмосферных условий

Большое количество проведенных измерений в различных сетях Запорожской и Днепропетровской областей, а также Ставропольского края показало, что при сухой погоде воздушным электрическим сетям 35, 10, 6 и 0,4 *кв*

свойственна одинаковая форма кривой напряжения линейных помех. Типичная форма напряжения помех на выходе устройства присоединения при схеме «фаза — земля» («фаза — фаза») показана на осциллограммах рисунков 16, *а*, *в*, (в сети 35 *кв*), 17, *а*, *в*, (в сети 6 *кв*) и 18, *а*, *б* (в сети 0,4 *кв*). Одновременная запись тока помех положительной полярности относительно полуволн трехфазного напряжения, выполнявшаяся с помощью шлейфового осциллографа, приведена на рисунках 16, *б*, *г* и 17, *б*, *г*. В нижней части осциллограмм имеются отметки времени через 2 *мсек*.

Приведенные данные показывают, что в воздушных сетях 0,4—35 *кв* существует одинаковая форма напряжения линейных помех, которая на выходе устройства присоединения имеет вид периодических всплесков. Они следуют с частотой 300 *гц*. Всплески появляются как за положительную, так и за отрицательную полярность высокого напряжения в каждой фазе линии. Амплитуда их неодинакова. При схеме «фаза — земля» обычно преобладает амплитуда каждого первого из трех всплесков. Всплески с большой амплитудой *1* и *4* (рис. 16, *а*) соответствуют тому проводу, с которым осуществляется контактная связь посредством устройства присоединения, остальные два всплеска с меньшей амплитудой *2*, *3* и *5*, *6* вызваны влиянием двух других проводов линии. Осциллограммы показывают, что при одной полярности высокого напряжения амплитуда всплесков несколько больше, чем от полуволн противоположной полярности (рис. 16, *а*, *б*; 17, *а*, *б* и 18, *а*). Это относится только к результатам измерения при схеме «фаза — земля». Кроме того, установлено, что всплески несимметричны относительно нулевой линии *AB* (рис. 16, *а*; 17, *а* и 18, *а*). У максимального всплеска 1 преобладает положительная полярность, а у всплеска *4* — отрицательная.

При схеме измерения «фаза — фаза» максимальные амплитуды имеют всплески *1*, *2*, *4*, *5* из каждых шести за период 50 *гц* (рис. 16,*в* и 17). Они соответствуют полуволнам высокого напряжения на фазах, к которым подключались устройства присоединения.

При обеих схемах измерения величина амплитуды всплесков имеет один и тот же порядок. Так, при 600-омном входном сопротивлении в сетях 35 *кв* ее величина составляет 8—11 *в*, в сетях 6—10 *кв* — 1—3 *в* и в сетях 0,4 *кв* — 0,3—1 *в*. На входном сопротивлении 1,5 *Мом* величина амплитуды

всплесков соответственно равна 70—80 *в* в сетях 35 *кв*, 8—10 *в* в сетях 6—10 *кв* и 3—5 *в* в сетях 0,4 *кв*.

Амплитуда всплесков изменяется хаотически, однако всегда остается вышеуказанное преобладание всплесков *1* и *4* при схеме подключения «фаза — земля» и *1* и *2*, *4* и *5* при схеме «фаза — фаза». Отношение амплитуд больших всплесков к меньшим обычно составляет (2,5—1,5) : 1.

Длительность всплесков во времени также изменяется, увеличиваясь при появлении сырой погоды. Минимальная их длительность соответствует $^1/_{30}$ части периода 50 *гц*, но обычно равна $^1/_9$—$^1/_{12}$ части периода. Каждый всплеск имеет крутой фронт нарастания напряжения и значительно меньшую скорость спадания.

Между всплесками всегда можно обнаружить помехи иного характера. Они имеют относительно постоянную амплитуду, независящую от атмосферных условий. Методом изменения нагрузки трансформатора было установлено, что эти весьма стабильные помехи, наблюдаемые на осциллограммах между всплесками, являются низкочастотными колебаниями (гармоники напряжения 50 *гц* и комбинационные составляющие, рассматриваемые в гл. III).

Форма кривой напряжения с шестью всплесками за период 50 *гц* является устойчивой при сухой погоде. При повышенной влажности, тумане или наступлении дождя число всплесков удваивается (рис. 16, *д*; 17, *д* и 18, *в*). Процесс перехода от шести всплесков к двенадцати продолжается несколько минут сначала в виде кратковременного их появления, затем длительного состояния, которое переходит в устойчивую форму с 12-ю всплесками. Наибольшие амплитуды при этом имеют *1*, *2* и *7*, *8* всплески при схеме измерения «фаза — земля» или *1—4* и *7—10* — при схеме «фаза — фаза». Расстояние между всплесками при этом неодинаково, обычно наблюдаются группы из двух всплесков: *1* и *2*, *3* и *4*, *5* и *6*, и т. д., имеющие между собой несколько меньшее расстояние, чем между группами. Напряжение помех с удвоенным числом всплесков при продолжительной сырой погоде и сильном дожде постепенно переходит к форме сплошных импульсов, промодулированных двойной частотой сети (рис. 16, *е*; 17, *е* и 18, *г*).

Всплески и причины их образования

Осциллограммы, сделанные электронным осциллографом с большой разрешающей способностью при однократной развертке, дали возможность обнаружить содержание всплесков. Каждый всплеск представляет собой периодические колебания с очень крутым фронтом нарастания [30, 37]. Частота этих колебаний постоянная и соответствует резонансной частоте элементов устройства присоединения (11—18 *кгц* для 35 *кв*, 10—17 *кгц* для 6—10 *кв* и 2—3 *кгц* для 0,4 *кв*). Типичная форма кривой напряжения всплеска, наблюдаемая на выходе устройства присоединения показана на рис. 19, *а*, *б*, *в*.

Всплеск, состоящий из одного затухающего колебания (колебательного импульса), возникает в результате ударного возбуждения реактивных элементов устройства присоединения отдельным импульсом в линии. По числу групп затухающих колебаний, содержащихся в каждом всплеске, удалось определить число импульсов, возбуждающих эти колебания, а также неодинаковые расстояния между импульсами группы. Таких импульсов в сети напряжением 0,4 *кв* за каждую полуволну высокого напряжения наблюдается один-два, в сети 6—10 *кв* — от одного до четырех и в сети 35 *кв* — от пяти до девяти импульсов. На осциллограмме рис. 19, *а* (сеть 0,4 *кв*) развернутый всплеск состоит из одного колебательного импульса, на осциллограмме рис. 19, *б* (сеть 6 *кв*) — трех импульсов (*1*, *2*, *3*) и на осциллограмме рис. 19, *в* (сеть 35 *кв*) — семи импульсов (*1*—*7*).

При исключении заземляющего дросселя из устройства присоединения и установке вместо него активного сопротивления удалось избежать резонансных явлений и зафиксировать непосредственно импульсы, сопровождающие частичные разряды в изоляторах линии (рис. 19, *г*, *д*, *е*). Так, на осциллограмме (рис. 19, *г*) четко выражены каждые два импульса, третий имеет очень малую амплитуду. Расстояние между импульсами равно 60°. Наибольший из них соответствует той фазе, к которой подключено устройство присоединения (импульсы *3* и *6*). На осциллограмме рис. 19, *д* (сеть 6 *кв*) видно, что каждому импульсу (*1*—*12*) предшествует небольшой и очень быстрый спад напряжения 50 *гц* на изоляторе, затем следует импульс напряжения. Частота следования их приблизительно равна 1500 *имп/сек*. На осциллограмме рис. 19, *е* при удвоенном числе импульсов

за период 50 *гц* наблюдается 3—4 следующих друг за другом импульса в каждой группе. Интересно также отметить, что частота их следования составляет 3600 *имп/сек*, т. е. приближается к предельно возможной частоте следования частичных разрядов на изоляторах, обусловленной временем деионизации газа в очагах разряда [71].

6. СПЕКТРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА СОСТАВЛЯЮЩИХ СОВОКУПНОСТИ ИМПУЛЬСОВ ОТ ИЗОЛЯТОРОВ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ

Обнаруженные закономерности появления импульсов от частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети дают возможность проанализировать спектральную структуру составляющих этих импульсов. Рассмотрение данного вопроса целесообразно начать с простейшего случая, последовательное усложнение которого позволит подойти к пониманию сложных процессов, происходящих в действительной линии.

Случай при $U_{z\,\text{мин}} = U_{\text{ф·макс}}$

Пусть минимальное напряжение зажигания газоразрядных элементов на изоляторах сети $U_{z\,\text{мин}} = U_{\text{ф.макс}}$. Считаем, что максимальное напряжение между проводом и землей достигается одновременно во всех точках сети. При этих условиях число действующих газоразрядных элементов сравнительно невелико. Кроме того, от каждого действующего очага частичного разряда за полуволну фазного напряжения может возникать только один импульс, момент появления которого совпадает с точкой максимума $U_{\text{ф}}$. Следовательно, все импульсы от частичных разрядов на изоляторах данной фазной группы возникают одновременно. Если принять, что действующие «газоразрядные элементы» на изоляторах сети обладают одинаковыми параметрами и равной интенсивностью, то в равнозначных фазных группах изоляторов возникают импульсы одинаковой амплитуды U и длительности $t_{\text{и}}$. В рассматриваемом случае от действия симметричной трехфазной системы напряжения в сети возникает периодическая последовательность импульсов чередующейся полярности.

При рассмотрении спектра составляющих периодической последовательности импульсов можно оперировать

наиболее простой формой напряжения импульса в виде прямоугольника, так как частотная структура спектра зависит не от формы импульса, а от характера следования этих импульсов [39]. Для принятых выше идеальных условий такая последовательность импульсов описывается импульсной функцией $u(\omega t)$ с периодом T, равным $^1/_3$ периода напряжения промышленной частоты T_{50} (рис. 20, *а*). Так как за каждый период T импульсная функция имеет конечное число разрывов, обладает конечным числом максимумов и ее интеграл за период является конечным [14], она может быть разложена в ряд Фурье

$$u(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t.$$

Если выбрать начало отсчета времени в момент, соответствующий середине импульса, то все коэффициенты ряда

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(\omega t) \sin n\omega t dt$$

обращаются в нуль, так как при таком выборе координатных осей функция становится четной. Кроме того, функция $u(\omega t)$, имеющая период 2π, такова, что $u(\omega t + \pi) = -u(\omega t)$, поэтому ее разложение в ряд содержит только нечетные гармоники $a_n \cos n\omega t$ без постоянной составляющей a_0. Коэффициенты ряда при косинусах находим путем интегрирования функции $u(\omega t)$ в пределах одного периода T:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(\omega t) \cos n\omega t dt. \qquad (4)$$

На основании рис. 20, *а* рассматриваемая импульсная функция принимает значение U при $-\frac{\omega t_и}{2} \leqslant \omega t \leqslant \frac{\omega t_и}{2}$; $-U$ при $-\pi \leqslant \omega t \leqslant (-\pi + \frac{\omega t_и}{2})$,

$$(\pi - \frac{\omega t_и}{2} \leqslant \omega t \leqslant \pi,$$

где $t_и$ — длительность импульса.

При указанных значениях интеграл (4) имеет решение:

$$a_n = \frac{4U}{n\pi} \sin n \frac{\omega t_и}{2},$$

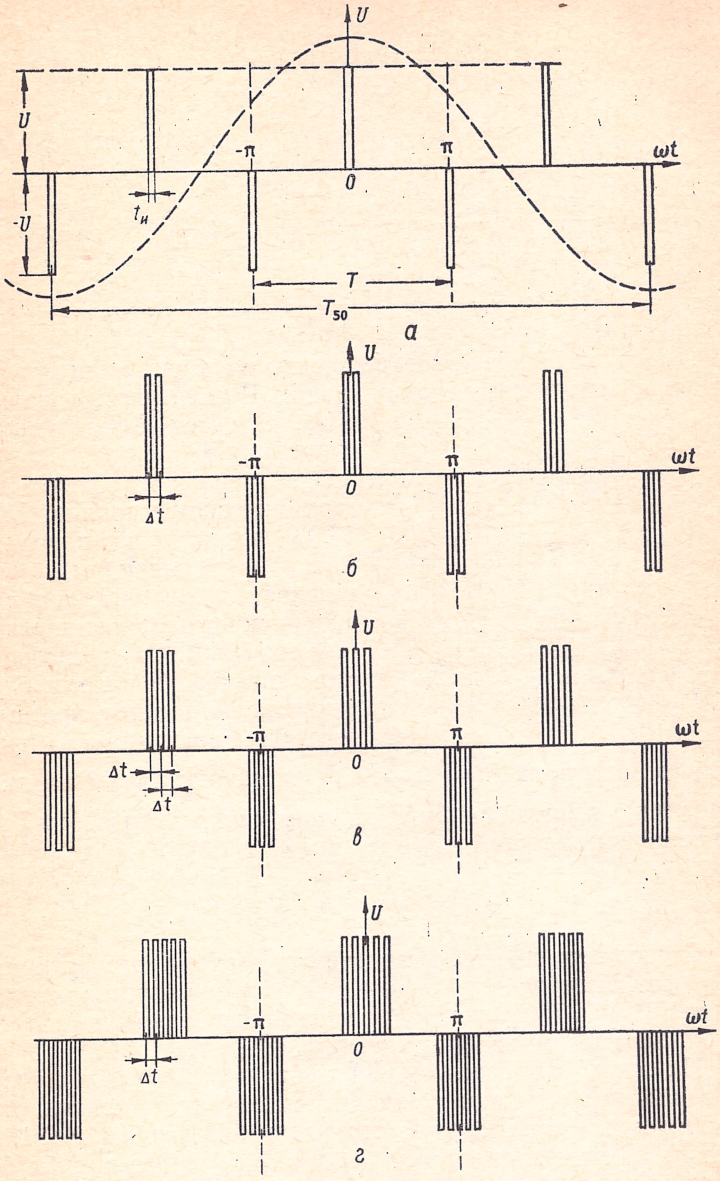


Рис. 20. Идеальная система зарядных импульсов от частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети:
а — $m = 1$; *б* — $m = 2$; *в* — $m = 3$; *г* — $m = 4$.

или

$$a_n = \frac{4U}{n\pi} \sin n \frac{\pi t_и}{T}. \qquad (5)$$

Тогда ряд Фурье для рассматриваемой последовательности импульсов принимает вид

$$u(\omega t) = \frac{4U}{\pi}\left[\sin \frac{\pi t_и}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t + \frac{1}{3} \sin 3 \frac{\pi t_и}{T} \cos \frac{6\pi}{T} t + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{5} \sin 5 \frac{\pi t_и}{T} \cos \frac{10\pi}{T} t + \ldots + \frac{1}{n} \sin n \frac{\pi t_и}{T} \cos \frac{2\pi n}{T} t + \ldots\right].$$

В этом выражении коэффициенты ряда являются амплитудными значениями составляющих. Рассмотрим их частотную, а затем амплитудную структуру.

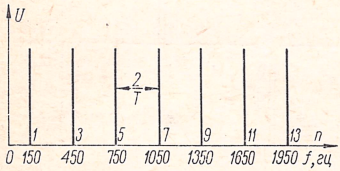


Рис. 21. Частотная структура составляющих периодической последовательности импульсов при идеальных условиях.

На основании работ по гармоническому анализу [14, 17, 39] известно, что периодическая функция $u(\omega t)$, приведенная на рис. 20, *а*, обладает дискретным или линейчатым спектром. Составляющие этого спектра образуют последовательность частот, кратных нечетным значениям основной частоты ряда $F = \frac{1}{T}$. Так как период ряда T составляет треть периода напряжения промышленной частоты T_{50}, то основная частота

$$F = \frac{3}{T_{50}} = 150 \text{ гц}.$$

Следовательно, рассматриваемая импульсная функция обладает бесконечным рядом нечетных гармоник с частотами 150, 450, 750 *гц* и т. д., представляя дискретную структуру составляющих с интервалом 300 *гц* (рис. 21).

На основании соотношений величин в выражении (5) проанализируем закономерность изменения амплитуд составляющих (амплитудную структуру). Величина коэффициента a_n определяется значением амплитуды импульса U и зависит от номера составляющей n, а также длительности импульса $t_и$. Проанализируем влияние величины n на ампли-

туду составляющих a_n в каждом случае. Для этого правую часть выражения (5) запишем с помощью двух сомножителей

$$a_n = a'_n a''_n,$$

где $a'_n = \frac{4U}{\pi} n^{-1}$; $a''_n = \sin n \frac{\pi t_и}{T}$.

Величина a'_n в функции от n убывает по гиперболическому закону $y = bx^{-1}$. Второй сомножитель a''_n в зависимости от номера гармоники изменяется по синусоидальному закону, принимая нулевые значения при аргументе

$$\frac{n\pi t_и}{T} = 0;\quad \pi;\quad 2\pi \text{ и т. д.}$$

Отсюда гармоники с нулевыми амплитудами n_0 соответственно равны

$$n_{01} = 0;\quad n_{02} = 1 \cdot \frac{T}{t_и};\quad n_{03} = 2 \cdot \frac{T}{t_и} \text{ и т. д.}$$

При значениях аргумента

$$\frac{n\pi t_и}{T} = \frac{\pi}{2};\ \frac{3\pi}{2};\ \frac{5\pi}{2} \text{ и т. д.}$$

a''_n принимает значения соответственно $+1$, -1, $+1$ и т. д.

Гармоники n_m, при которых a''_n имеет максимальные значения, соответственно равны:

$$n_{m1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{T}{t_и};\quad n_{m2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{T}{t_и};\quad n_{m3} = \frac{5}{2} \cdot \frac{T}{t_и} \text{ и т. д.}$$

Зная величину длительности импульса $t_и$, можно легко определить номера гармоник, при которых функция a''_n принимает нулевые значения. Однако в литературе имеется мало сведений о параметрах импульсов, сопровождающих частичные разряды в изоляторах. Имеющиеся данные неточны и отличаются на несколько порядков.

Чтобы ориентировочно представить амплитудную структуру составляющих от импульсов, сопровождающих частичные разряды на изоляторах линий, воспользуемся некоторыми данными из работ по исследованию разрядных явлений в изоляторах и в схемах их замещения. Путем осциллографирования зарядных импульсов тока при частичных

разрядах в отдельном изоляторе, определена длительность импульса, равная 10 *мксек* [71]. В гирлянде изоляторов длительность импульса составила величину $15 \cdot 10^{-9}$ *сек* [56], а в работе [70] — порядка 10^{-8}—10^{-6} *сек*. Исследования, проведенные автором на линиях 6, 10 и 35 *кв*, показали, что

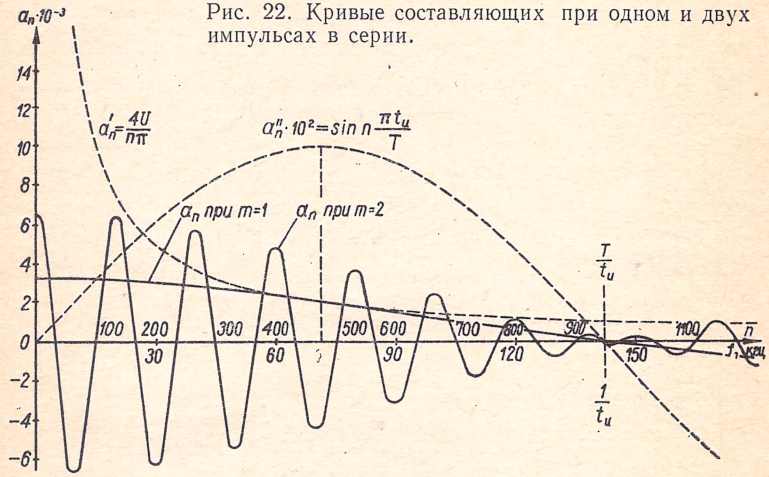


Рис. 22. Кривые составляющих при одном и двух импульсах в серии.

наиболее вероятной длительностью зарядного импульса является величина порядка 3—11 *мксек* [30]. Эти значения весьма близки к результатам, полученным в работах [70, 71].

На основании этих данных принято наиболее вероятное значение длительности импульса $t_и = 7$ *мксек*, необходимое для построения амплитудной зависимости составляющих спектра согласно выражению [5]. Для упрощения графической зависимости сомножителей a'_n и a''_n от n коэффициент $\frac{4}{\pi}$ принят равным единице.

Закономерности изменения этих сомножителей и их результирующего значения a_n, которое является огибающей амплитуд составляющих спектра, изображены кривыми на рис. 22.

В результате проведенного анализа структуры помех от частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети для идеального случая, когда $U_{z\,мин} = U_{ф.макс}$, установлены следующие закономерности:

1) импульсы помех, появляющиеся синхронно с максимумами фазного напряжения в линии, обладают дискретным спектром;

2) составляющими спектра являются нечетные гармоники с частотами 150, 450, 750 *гц* и т. д.;

3) величина напряжения гармонических составляющих пропорциональна амплитуде импульсов и с ростом частоты уменьшается по косинусоидальной кривой, принимающей нулевые значения на частотах, равных $\frac{1}{t_и}$, $\frac{2}{t_и}$, $\frac{3}{t_и}$ и т. д.

Случай при $U_{гмин} < U_{ф\cdot макс}$

Рассмотрим спектральную структуру составляющих n при несколько меньшем уровне напряжения зажигания «газоразрядных элементов», определяемом выражением [2]. При указанном условии в каждом «элементе» может происходить не один, а несколько разрядов в течение полуволны фазного напряжения. Следовательно, от каждого очага частичных разрядов по линии может распространяться не один, а серия импульсов. Для упрощения рассуждений на данном этапе принимаем во внимание только лишь преобладающие по амплитуде импульсы от ближайших очагов частичного разряда и пренебрегаем влиянием меньших по амплитуде импульсов от дальних очагов.

Определим закономерность изменения структуры составляющих n в зависимости от количества импульсов в серии. При этом принимаем следующие исходные данные: серии импульсов следуют периодически, синхронно с максимумами фазного напряжения; импульсы, возникающие за положительную и отрицательную полярность фазного напряжения, имеют одинаковые амплитуды U; каждая серия содержит одно и то же число импульсов m; импульсы в каждой серии следуют через равные интервалы времени Δt. Соответственно принятым условиям на рис. 20 показаны импульсные функции при различном количестве импульсов в серии. Структура составляющих анализировалась методом разложения функции в ряд Фурье аналогично предыдущему случаю при $m = 1$. Полученные выражения n-й составляющей при различном числе импульсов в серии имеют вид

$$\frac{4U}{n\pi} \sin n \frac{\pi t_и}{T} [1] \cos \frac{2\pi}{T} t \qquad (m = 1); \tag{6}$$

$$\frac{8U}{n\pi}\sin n\frac{\pi t_и}{T}\left[\cos\frac{2\pi}{T}\left(\frac{\Delta t}{2}\right)\right]\cos n\frac{2\pi}{T}t \qquad (m=2);\ (7)$$

$$\frac{4U}{n\pi}\sin n\frac{\pi t_и}{T}\left[1+2\cos n\frac{2\pi}{T}(\Delta T)\right]\cos n\frac{2\pi}{T}t \qquad (m=3);\ (8)$$

$$\frac{8U}{n\pi}\sin n\frac{\pi t_и}{T}\left[\cos n\frac{2\pi}{T}\left(\frac{\Delta t}{2}\right)+\right.$$

$$\left.+\cos n\frac{2\pi}{T}\left(\frac{3\Delta t}{2}\right)\right]\cos n\frac{2\pi t}{T}t \qquad (m=4);\ (9)$$

$$\frac{4U}{n\pi}\sin n\frac{\pi t_и}{T}\left[1+2\cos n\frac{2\pi}{T}(\Delta t)+\right.$$

$$\left.+2\cos n\frac{2\pi}{T}(2\Delta t)\right]\cos n\frac{2\pi}{T}t \qquad (m=5).\ (10)$$

Следовательно, амплитуда n-й составляющей при числе импульсов в серии, равном m, имеет выражение

$$a_n=\frac{4U}{n\pi}\sin n\frac{\pi t_и}{T}\sum_{m=p}^{i}(m_i-m_{i-2})\cos n\frac{\pi(m-1)\Delta t}{T}, \qquad (11)$$

где под знаком суммы берутся члены или только с нечетными числами импульсов в серии, т. е. $p=1, 3, 5, \ldots, i$, или только с четными числами $p=2, 4, 6, \ldots, i$.

Анализ спектральной структуры импульсных функций, изображенных на рис. 20, показал, что составляющие этих функций представляют собой бесконечный ряд нечетных гармоник. Поскольку основной период функций определяется периодом повторения серий импульсов, равным $\frac{1}{3}T_{50}$, частоты основной и высших гармоник для всех функций, приведенных на рис. 20, равны 150, 450, 750 *гц* и т. д. Следовательно, частотная структура составляющих не зависит от числа импульсов в серии. Она имеет такой же дискретный характер, как и для рассмотренного ранее случая при $m=1$ (рис. 21).

Амплитудная структура составляющих существенно меняется в зависимости от числа импульсов в серии. Как показывают выражения (6)—(10), при увеличении числа импульсов в серии составляющие приобретают дополнительные члены (в квадратных скобках).

Аналогично выражению (5) запишем уравнение (11) в следующем виде:

$$a_n = a_n' a_n'' a_n''',$$

где $a_n''' = \sum_{m=p}^{i} (m_i - m_{i-2}) \cos n \frac{\pi (m-1)\Delta t}{T}$.

Сомножитель a_n''', содержащий параметр m, при значениях $m_i > 2$ изменяется по сложному колебательному закону по мере возрастания n. При этом a_n''' чаще принимает нулевые

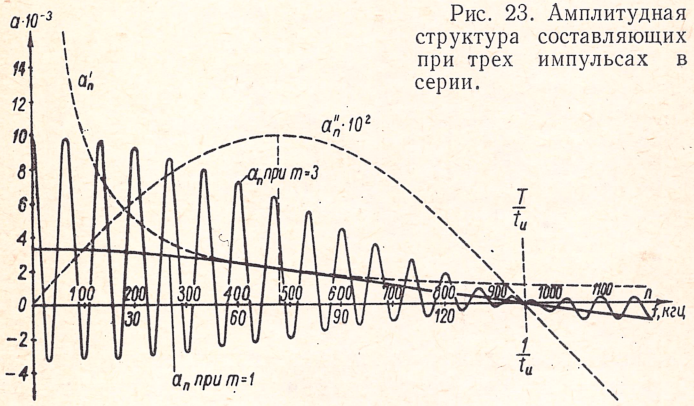


Рис. 23. Амплитудная структура составляющих при трех импульсах в серии.

значения чем a_n'', так как длительность импульса во много раз меньше интервала времени между импульсами [71]. Известно, что параметр Δt, определяемый частотой повторения частичных разрядов на изоляторе, зависит от времени деионизации среды в «газоразрядном элементе». При атмосферных условиях время деионизации газа составляет величину порядка 10^{-5} *сек*, поэтому частота повторения разрядов (импульсов) ограничена 10^4—10^5 1/*сек*.

Приняв $\Delta t = 10^{-4}$ *сек*, $\frac{4}{\pi} = 1$ и $t_и = 7 \cdot 10^{-6}$ *сек*, по формулам (7), (8) и (10) рассчитаны амплитудные значения составляющих для двух, трех и пяти импульсов в серии.

Амплитудная структура спектра составляющих при $m = 1, 2, 3, 5$ представлена на рис. 22—24 в виде огибающей амплитуд составляющих. Для количественного сравнения

их амплитуд в зависимости от числа импульсов в серии на рис. 22—24 нанесена огибающая a_n при $m = 1$.

В результате проведенного анализа структуры составляющих в зависимости от количества импульсов в серии обнаружены следующие закономерности: 1) при наличии двух и более импульсов огибающая амплитудных значений составляющих имеет колебательный характер; 2) максимумы

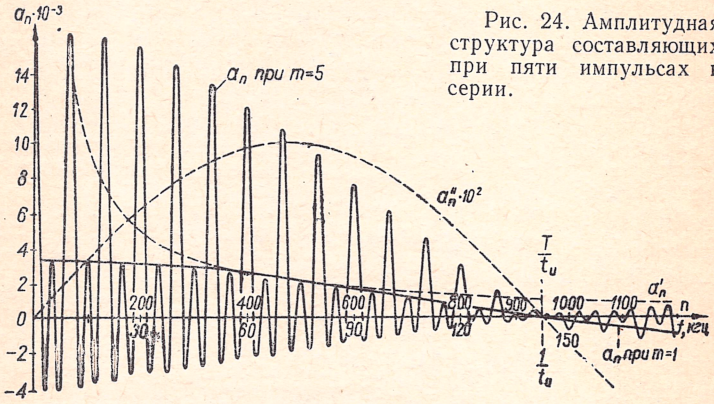


Рис. 24. Амплитудная структура составляющих при пяти импульсах в серии.

огибающей возрастают в m раз относительно огибающей при $m = 1$; 3) частота колебаний огибающей увеличивается в m — 1 раз; 4) частотная структура составляющих не зависит от количества импульсов в серии и представляет дискретный характер с интервалом между составляющими 300 *гц*.

Функции, изображенные на рис. 20, следует рассматривать как идеальную совокупность импульсов, возникающую от частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети. Спектр такой строго периодической последовательности одинаковых по амплитуде и длительности импульсов за сравнительно длительный отрезок времени представляется в виде спектральных линий (рис. 21), которые символизируют концентрацию энергии на частотах $\frac{2\pi n}{T}$, кратных нечетным значениям частоты повторения импульсов $\frac{2\pi}{T}$. Однако в действительной трехфазной сети строго периодического следования импульсов не существует. Парамет-

ры «газоразрядных элементов», которые зависят от множества факторов атмосферного состояния, различного на тех или иных участках сети, обусловливают неодинаковые моменты возникновения разрядов. Поэтому моменты появления импульсов следует считать случайными величинами, колеблющимися около точек максимума $U_ф$.

Принятая выше одинаковая интенсивность очагов частичного разряда на изоляторах действительной сети не существует. Амплитуду импульсов и их длительность также следует считать случайными величинами, колеблющимися около некоторых своих средних значений.

Следовательно, трехфазная воздушная сеть в действительности обладает последовательностью импульсов, амплитуда, длительность и моменты возникновения которых могут рассматриваться случайными функциями времени. Для анализа структуры составляющих такого случайного процесса аппарат гармонического анализа неприменим. Дальнейшее решение поставленной задачи необходимо производить методами теории вероятностей, в частности, методами теории случайных процессов [21].

СЛУЧАЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ, ИМЕЮЩИХ СЛУЧАЙНУЮ АМПЛИТУДУ

Рассмотрим спектральную структуру составляющих последовательности равноотстоящих импульсов прямоугольной формы, имеющих одинаковую длительность $t_и$ и случайную амплитуду. Данная последовательность импульсов рассматривается относительно той же системы отсчета времени — 50-периодной кривой напряжения. Обозначим через T период повторения импульсов, а случайную амплитуду p - го импульса — через $U_ξ$. Определим амплитудную и частотную структуру составляющих последовательности импульсов, изображенных на рис. 25, когда величина их амплитуды представляет случайную функцию времени $U_ξ$.

При анализе спектральной структуры импульсного случайного процесса обычно пользуются понятием энергетического спектра $F(ω)$. Любая ордината энергетического спектра, представляя интенсивность составляющей, определяет плотность энергии на данной частоте [17, 39 и др.]. Так как импульсный случайный процесс определяется бесконечным множеством реализаций, каждая из которых

представляет собой последовательность импульсов, выделим, например, k-ую последовательность, состоящую в данном случае из p, i, q импульсов и т. д., и рассмотрим $2N + 1$ импульсов, расположенных по обе стороны от нулевого импульса (рис. 25).

Обозначим через $Z_{kN}(\omega)$ спектральную плотность функции, описывающей k-ую последовательность импульсов, и запишем ее в виде суммы спектральных плотностей импульсов V_p:

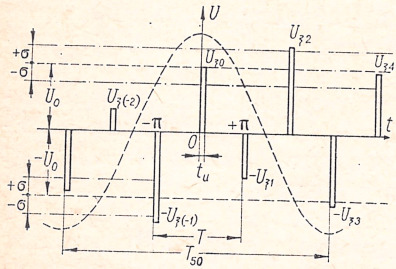


Рис. 25. Периодическая последовательность импульсов, имеющих случайную амплитуду.

$$Z_{kN}(\omega) = \sum_{p=-N}^{N} V_p^{(k)} e^{jp\omega T}, \quad (12)$$

где $V_p^{(k)} = F_p^{(k)}(\omega)\, e^{jp\omega T}$. Определим среднюю мощность $G(\omega)$ последовательности $2N + 1$ импульсов. Зная, что любая ордината энергетического спектра равна удвоенному квадрату соответствующей ординаты амплитудного спектра, находим среднюю мощность при $N \to \infty$:

$$G_k(\omega) = \lim_{N\to\infty} \frac{2}{(2N+1)\dfrac{T}{2}} [Z_{kN}(\omega)]^2. \quad (13)$$

Тогда энергетический спектр рассматриваемого случайного процесса определяется путем перехода от k-ой последовательности к множеству реализаций. Для этого необходимо выполнить дополнительное усреднение величины $G(\omega)$ по множеству ее возможных реализаций:

$$F(\omega) = m_1 \{G_k(\omega)\}, \quad (14)$$

где $m_1\{G_\kappa(\omega)\}$ — операция усреднения величины $G(\omega)$, выполняемая по определенному правилу теории вероятностей [21].

На основании уравнений (12) и (13) запишем выражение (14), вынося постоянные величины за знак предела:

$$F(\omega) = \frac{4}{T} \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1} m_1 \left\{ \left[\sum_{p=-N}^{N} V_p^{(k)} e^{jp\omega T} \right] \right\}^2. \quad (15)$$

Для определения $F(\omega)$ необходимо сначала найти среднее по множеству, т. е. по индексу k от $[Z_{kN}(\omega)]^2$. Так как

$$[Z_{kN}(\omega)]^2 = Z_{kN}(\omega)\,\overline{Z}_{kN}(\omega), \tag{16}$$

то

$$[Z_{\kappa N}(\omega)]^2 = \sum_{p=-N}^{N}\sum_{i=-N}^{N} V_p^{(k)}\overline{V}_i^{(k)} e^{j\omega(p-i)T}. \tag{17}$$

В уравнениях (16) и (17) черта над знаками $Z(\omega)$ и V обозначает комплексно-сопряженную величину. Группируя в выражении (17) члены, соответствующие p и i импульсам, а также учитывая, что среднее от суммы равно сумме средних слагаемых, получим среднее по множеству:

$$m_1\{[Z_{kN}(\omega)]^2\} = \sum_{p=-N}^{N} m_1\left\{\left[V_p^{(k)}\right]^2\right\} + \\ + \sum_{p=-N}^{N}\sum_{i=-N}^{N} m_1\{V_p^{(k)}\overline{V}_i^{(k)} e^{j(p-i)\omega T}\}. \tag{18}$$

$$p \neq i$$

Так как в рассматриваемом случае амплитуды импульсов p, i взаимно независимы и для совокупности импульсов не имеет значения, какой из них принимается за нулевой, выражение (18) значительно упрощается. Обозначим через $\kappa(\omega)$ первое слагаемое, т. е.

$$m_1\left\{\left[V_p^{(k)}\right]^2\right\} = k(\omega), \tag{19}$$

тогда

$$\sum_{p=-N}^{N} m_1\left\{\left[V_p^{(k)}\right]^2\right\} = (2N+1)\,k(\omega). \tag{20}$$

Учитывая взаимную независимость амплитуд импульсов p — i, второе слагаемое в выражении (18) можно записать в следующем виде:

$$m_1\{V_p^{(k)}\overline{V}_i^{(k)}\} = m_1\{V_p^{(k)}\}\,m_1\{V_i^{(k)}\} = [H(\omega)]^2, \tag{21}$$

где

$$H(\omega) = m_1\{V_p^{(k)}\}. \tag{22}$$

При указанных обозначениях двойная сумма в выражении (18) после преобразований

$$\sum_{p=-N}^{N}\sum_{i=-N}^{N} m_1\{V_p^{(k)}\overline{V}_i^{(k)}\}\,e^{j(p-i)\omega T} = \\ = 2\sum_{p=1}^{2N}(2N+1-p)\,H_p(\omega)\cos p\omega T. \tag{23}$$

Подставляя выражения (21) и (23) в (18) и учитывая уравнение (15), находим

$$F(\omega) = \frac{4}{T}\left\{k(\omega) + \lim_{N-\infty} 2\sum_{p=1}^{2N}\left(1 - \frac{p}{2N+1}\right) H_p(\omega)\cos p\omega T\right\}.$$

Если обозначить

$$\psi(\omega) = 2\lim_{N\to\infty}\sum_{p=1}^{2N}\left(1 - \frac{p}{2N+1}\right)[H_p(\omega) - |H(\omega)|^2]\cos p\omega T, \quad (24)$$

то при взаимной независимости амплитуд импульсов p, i, q, $H_p(\omega) = [H(\omega)]^2$ выражение (24) обращается в нуль. Тогда энергетический спектр рассматриваемого импульсного процесса описывается выражением

$$F(\omega) = \frac{4}{T}\left\{k(\omega) - [H(\omega)]^2 + [H(\omega)]^2\frac{2\pi}{T}\sum_{n\to\infty}^{\infty}\delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)\right\}, \quad (25)$$

в котором непрерывная часть спектра

$$F_{\text{н}}(\omega) = \frac{4}{T}\{k(\omega) - [H(\omega)]^2\},$$

а дискретная его часть

$$F_{\text{д}}(\omega) = \frac{8\pi}{T^2}H[(\omega)]^2\sum_{n=-\infty}^{\infty}\delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right).$$

Последнее выражение представляет собой сумму членов, содержащих дельта-функции $\delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)$ на частотах гармоник n разложения периодической функции в ряд Фурье. Каждая составляющая представляет собой импульсную дельта-функцию, которая характерна следующим общеизвестным соотношением:

$$\delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right) = \begin{cases} 0 \text{ при } \omega \neq \dfrac{2\pi n}{T} \\ \infty \text{ при } \omega = \dfrac{2\pi n}{T}, \end{cases}$$

причем, интеграл этой функции в пределах от $-\infty$ до ∞ равен единице.

Изобразим в относительных единицах спектральную структуру составляющих импульсного случайного процес-

са $U_\xi(t)$, показанного на рис. 25. Считаем, что амплитуды импульсов p — q взаимно независимы и обладают нормальным законом распределения случайной величины. Например, это соответствует модуляции амплитуд импульсов белым шумом. Если принять амплитуду нулевого импульса, возникающего в момент времени $t = 0$, за единицу, а его спектральную плотность обозначить через

$$g(\omega) = \frac{2}{\omega} \sin \frac{\omega t_и}{2}, \tag{26}$$

то спектральная плотность p-го импульса

$$V_p = U_\xi g(\omega). \tag{27}$$

На основании выражений (19), (22) и (27)

$$K(\omega) = m_1\{U_\xi^2 [g(\omega)]^2\} = [g(\omega)]^2 m_1\{U_\xi\}^2; \tag{28}$$

$$H(\omega) = m_1\{U_\xi [g(\omega)]^2\} = [g(\omega)]^2 m_1\{U_\xi\}. \tag{29}$$

Пусть $W_1(x)$ есть одномерная функция распределения случайных амплитуд U_ξ, одинаковая для всех импульсов, а среднее значение их случайных амплитуд U_0, т. е.

$$m_1\{U_\xi\} = \int_{-\infty}^{\infty} xW_1(x)\,dx = U_0. \tag{30}$$

Разброс значений случайных амплитуд импульсов около их среднего значения U_0, называемый в теории случайных функций дисперсией σ^2 случайной величины U_ξ, равен разности суммарной числовой характеристики случайных амплитуд m_2 (начальный момент распределения второго порядка) и квадрата их среднего значения U_0, т. е.

$$\sigma^2 = M\{U_\xi\} = m_2\{U_\xi\} - m_1^2\{U_\xi\} = \int_{-\infty}^{\infty} (U_\xi - U_0)^2 W_1(x)\,dx, \tag{31}$$

где $m_2\{U_\xi\} = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 W_1(x)\,dx$.

На основании соотношений (30) и (31) выражения (28) и (29) принимают вид

$$K(\omega) = [g(\omega)]^2 (\sigma^2 + U_0^2); \tag{32}$$

$$H(\omega) = [g(\omega)] U_0. \tag{33}$$

Следовательно, согласно выражению (25) энергетический спектр периодической последовательности импульсов со

случайной амплитудой

$$F(\omega) = \frac{4}{T}\sigma^2 [g(\omega)]^2 + \frac{8\pi}{T^2} U_0^2 [g(\omega)]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right), \quad (34)$$

или, принимая во внимание выражение (26),

$$F(\omega) = \frac{16\sigma^2}{\omega^2 T} \sin^2 \frac{\omega t_и}{2} + \frac{32 U_0^2 \pi}{\omega^2 T^2} \sin^2 \frac{\omega t_и}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right). \quad (35)$$

Первое слагаемое в выражении (35) представляет собой непрерывную часть энергетического спектра, аналогичного спектру одиночного импульса. Оно показывает, что дисперсия σ^2 случайной амплитуды импульсов является основным параметром, характеризующим непрерывный спектр. Второе слагаемое в выражении (35) представляет дискретную часть спектра, которая состоит из суммы составляющих с частотами, кратными нечетным гармоникам частоты следования импульсов. По своей частотной структуре спектр соответствует составляющим периодической последовательности импульсов с одинаковыми амплитудами, равными среднему значению случайных амплитуд (см. рис. 21).

Рассмотрим соотношение суммарной энергии непрерывной и дискретной части энергетического спектра. Из выражения (34) энергия непрерывной части

$$W_н(\omega) = \frac{4\sigma^2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} [g(\omega)]^2 \, d\omega, \quad (36)$$

а энергия дискретной части спектра

$$W_д(\omega) = \frac{4U_0^2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\pi}{T} [g(\omega)]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right) d\omega =$$

$$= \frac{4U_0^2}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[g\left(\frac{2\pi n}{T}\right)\right]^2 \frac{2\pi}{T} \approx \frac{4U_0^2}{T} \int_{-\infty}^{\infty} [g(\omega)]^2 \, d\omega. \quad (37)$$

Из выражений (36) и (37) следует, что отношение энергии непрерывной и дискретной части спектра α зависит от среднего квадратического отклонения случайной амплитуды импульса σ от ее среднего значения U_0:

$$\alpha = \left(\frac{\sigma}{U_0}\right)^2.$$

Если принять $U_0 = 1$; $\alpha = 0{,}5$; $t_и = 7 \cdot 10^{-6}$ *сек*, то огибающие непрерывной и дискретной части энергетического спектра рассмотренной последовательности импульсов имеют вид, изображенный на рис. 26. Следует заметить, что в отличие от амплитудной структуры спектра на рис. 22—24

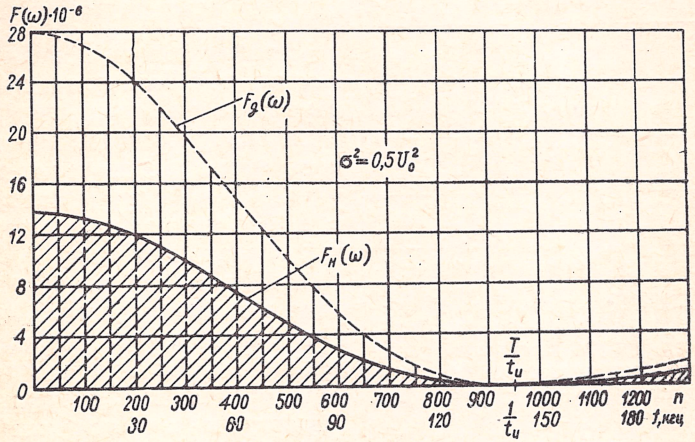


Рис. 26. Амплитудная структура составляющих энергетического спектра периодической последовательности импульсов со случайной амплитудой.

ординаты огибающих энергетического спектра на рис. 26 равны квадратам соответствующих ординат амплитудного спектра, представленных в относительных единицах.

Проанализируем влияние параметра σ на структуру непрерывной части энергетического спектра в выражении (35). Для этого применим известный в теории вероятностей нормальный закон распределения случайной величины:

$$W(x) \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где $W(x)$ — плотность вероятности непрерывной случайной величины; a — наивероятнейшее значение случайной величины x; σ — среднее квадратическое отклонение случайной величины от ее среднего значения.

Нормальный закон распределения, изображаемый на рис. 27 гауссовой кривой распределения вероятностей,

имеет максимум в точке $x = a$, соответствующей наибольшей плотности вероятности

$$W(a) = W_{\text{макс}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

и точки перегиба при $x = a \pm \sigma$, в которых кривая распределения имеет максимальную кривизну.

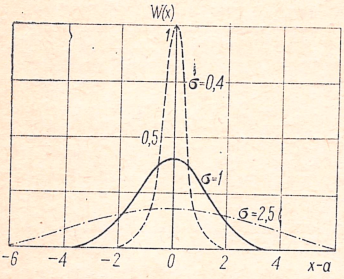


Рис. 27. Кривые плотности вероятности нормального распределения при различных значениях среднеквадратического отклонения случайной величины.

Эти выражения показывают, что чем больше значение параметра σ, тем меньше максимальная плотность вероятности и тем дальше точки перегиба от максимума кривой, т. е. больше разнесены весомые значения функции $W(x)$. И наоборот, чем меньше параметр σ, тем больше $W_{\text{макс}}$ и тем более компактны весомые значения функции $W(x)$. При предельных значениях среднеквадратичного отклонения случайной величины, когда $\sigma \to \infty$, кривая распределения сливается с осью абсцисс, а при $\sigma \to 0$

$$\lim_{\sigma \to 0} W(x) = \lim_{\sigma \to 0} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} = \sigma(x - a), \qquad (38)$$

т. е. кривая распределения принимает закон изменения дельта-функции.

Приведенные закономерности показывают, что в зависимости от значения параметра σ непрерывная часть энергетического спектра в выражении (35) может изменять структуру составляющих от сплошного характера до дискретного. Если, например, случайная амплитуда периодической последовательности импульсов (рис. 25) изменяется в небольших пределах, то среднее квадратическое отклонение случайных амплитуд импульсов $\sigma \ll 1$. В этом случае плотность вероятности непрерывной случайной величины сосредотачивается около предельного значения, которое кривая распределения принимает в соответствии с законом дельта-функции. Это значит, что спектральная плотность, соответствующая каждому импульсу периодической последовательности, сосредотачивается около дискретных составляющих.

При уменьшении σ степень сосредоточения непрерывного спектра возрастает, придавая ему сначала характер периодически повторяющихся полос сплошного спектра, а в пределе — характер дискретных линий. Если, например, случайная амплитуда импульсов периодической последовательности модулирована белым шумом, равномерным в ограниченной полосе Δ, которая меньше или равна $^1/_2$ частотного интервала между импульсами (рис. 25), то около каждой дискретной составляющей сосредотачивается непрерывный спектр в полосе частот шириной 2Δ, как показано на рис. 28.

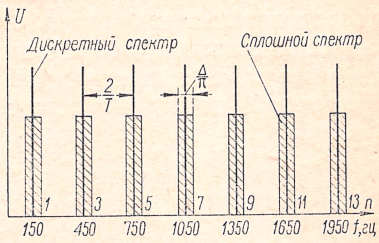


Рис. 28. Частотная структура спектра периодической последовательности импульсов при $\frac{\sigma^2}{U^2} \ll 1$.

При увеличении параметра σ ширина этих полос увеличивается. При значении $\Delta = \frac{\pi}{T}$ пробелы между полосами исчезают и спектр становится сплошным.

В результате проведенного анализа структуры составляющих периодической последовательности импульсов, имеющих случайную амплитуду, установлены следующие закономерности:

1) частотная структура составляющих рассмотренной последовательности импульсов представляет сочетание сплошного и дискретного спектра;

2) амплитудная структура составляющих сплошного спектра аналогична структуре одиночного импульса;

3) интенсивность составляющих сплошного спектра пропорциональна разбросу значений случайной амплитуды импульсов около их среднего значения U_0;

4) дискретные составляющие спектра представляют бесконечный ряд гармоник n с частотами, кратными нечетным значениям частоты повторения импульсов $F = \frac{3n}{T_{50}} = 150$; 450; 750 *гц* и т. д.;

5) отношение энергии непрерывной части спектра к энергии дискретной части пропорционально квадрату отношения среднеквадратичного отклонения случайных амплитуд импульсов к их среднему значению U_0.

СЛУЧАЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОДИНАКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СЛУЧАЙНЫЕ МОМЕНТЫ ВРЕМЕНИ

Рассмотрим спектральную структуру составляющих последовательности импульсов прямоугольной формы, обладающих одинаковой амплитудой U_0 и длительностью $t_и$, но возникающих в случайные моменты времени (рис. 29). Указанную последовательность импульсов рассматриваем относительно принятой ранее системы отсчета времени — кривой напряжения промышленной частоты. Отклонение момента появления каждого импульса относительно тактового интервала $\frac{T}{2} = \frac{1}{6}T_{50}$ представляет случайную функцию времени $\nu(t)$. Моменты появления импульсов считаем взаимно независимыми, а величину отклонения ν считаем подчиняющейся нормальному закону распределения случайных величин.

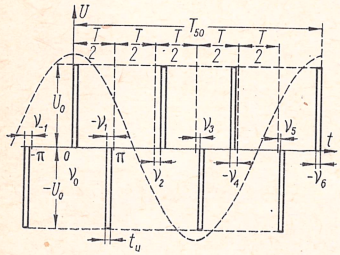


Рис. 29. Последовательность импульсов, имеющих случайное время возникновения и одинаковые амплитуду и длительность.

Если отклонение импульса, возникающего в начальный момент времени принять равным нулю, а его спектральную плотность обозначить согласно выражению (26), то спектральная плотность p-го импульса

$$V_p = g(\omega)\, e^{j\omega\nu_p}. \tag{39}$$

Применяя изложенный выше метод усреднения случайных величин в соответствии с выражениями (12)—(14), (18)—(20) и (39), получаем

$$K(\omega) = m_1\{[g(\omega)]^2\} = [g(\omega)]^2. \tag{40}$$

Считая моменты появления любой пары импульсов p—i взаимно независимыми, на основании выражений (21) и (22) получаем

$$[H(\omega)]^2 = m_1\{[g(\omega)]^2 e^{j\omega\nu}\} = [g(\omega)]^2\,[\Theta(\omega)]^2, \tag{41}$$

где $\Theta(\omega) = m_1\{e^{j\omega\nu}\} = \int_{-\infty}^{\infty} W_1(x)\, e^{j\omega\nu}\, dx$ является средним значением случайной величины $e^{j\omega\nu}$ и называется характеристической функцией распределения вероятностей.

Подставляя выражения (40) и (41) в уравнение (25), находим энергетический спектр для последовательности одинаковых импульсов, возникающих в случайные моменты времени,

$$F(\omega) = \frac{4}{T}[g(\omega)]^2 \left\{1 - [\Theta(\omega)]^2 + \frac{2\pi}{T}[\Theta(\omega)]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)\right\}, \tag{42}$$

где непрерывная часть спектра

$$F_{н}(\omega) = \frac{4}{T}[g(\omega)]^2 \{1 - [\Theta(\omega)]^2\},$$

а дискретная часть

$$F_{д}(\omega) = \frac{8\pi}{T^2}[g(\omega)]^2 [\Theta(\omega)]^2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right).$$

Выражение (42) показывает, что амплитудная структура составляющих энергетического спектра рассматриваемой последовательности импульсов зависит от квадрата характеристической функции распределения случайных отклонений момента появления импульсов относительно ритма времени $\frac{T}{2}$.

Интенсивность составляющих дискретной части энергетического спектра пропорциональна квадрату среднего значения случайной величины $e^{j\omega v}$, т. е. квадрату характеристической функции $[\Theta(\omega)]^2$, а интенсивность составляющих непрерывной части пропорциональна значению $1 - [\Theta(\omega)]^2$.

Частотная структура дискретной части спектра определяется законом дельта-функции и представляет собой бесконечный ряд гармоник, кратных нечетным значениям средней частоты повторения импульсов $\frac{1}{T}$ (рис. 21).

Изобразим в относительных единицах амплитудную структуру энергетического спектра рассматриваемой последовательности импульсов со случайным временем появления. Если отклонение моментов появления импульсов относительно тактового времени $\frac{T}{2}$ считать нормальным случайным процессом, имеющим среднее отклонение, равное нулю, то рассматриваемый процесс можно представить как временную

модуляцию импульсов белым шумом. Кроме того, если рассматриваемая последовательность импульсов (рис. 29) удовлетворяет условию $\sigma < \frac{T}{2}$, т. е. среднее квадратическое отклонение моментов появления импульсов относительно тактового интервала меньше длительности самого интервала, то характеристическая функция такого случайного процесса имеет значение

$$\Theta(\omega) = e^{-\frac{\sigma^2\omega^2}{2}}. \tag{43}$$

При указанных условиях на основании выражения (42) энергетический спектр рассматриваемого импульсного процесса

$$F(\omega) = \frac{4}{T}[g(\omega)]^2 \left\{1 - e^{-\sigma^2\omega^2} + \frac{2\pi}{T} e^{-\sigma^2\omega^2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)\right\}. \tag{44}$$

Учитывая выражение (38) и принятые выше параметры импульсов U и $t_и$, непрерывная и дискретная части энергетического спектра на основании (44) принимают следующие значения:

$$F_н(\omega) = \frac{16U_0^2}{\omega^2 T} \sin^2\frac{\omega t_и}{2}\left\{1 - e^{-\sigma^2\omega^2}\right\}; \tag{45}$$

$$F_д(\omega) = \frac{32U_0^2\pi}{\omega^2T^2} e^{-\sigma^2\omega^2} \sin^2\frac{\omega t_и}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right). \tag{46}$$

При предельных значениях величины отклонения, когда $\sigma \to 0$

$F_н = (\omega) \to 0$, а $F_д(\omega) \to \max$. При $\frac{T}{2}$ $F_н(\omega) \to \max$, $F_д(\omega) \to 0$.

На основании выражений (45) и (46) рассчитаны составляющие энергетического спектра при значениях $U_0 = 1$ и $t_и = 7 \cdot 10^{-6}$ *сек*. На рис. 30 изображена амплитудная структура составляющих энергетического спектра рассмотренной последовательности импульсов при трех значениях среднего квадратического отклонения моментов появления импульсов: $\sigma = 0{,}05\, t_и$; $0{,}5\, t_и$; $5\, t_и$. Кривые показывают, что незначительные отклонения момента появления импульсов от тактового интервала времени вызывают преобладание составляющих сплошного спектра.

В результате анализа структуры составляющих последовательности одинаковых импульсов, имеющих случай-

ное время появления, установлены следующие закономерности:

1) спектр содержит составляющие непрерывного и дискретного характера;

2) интенсивность составляющих непрерывной и дискретной части спектра зависит от квадрата характеристической

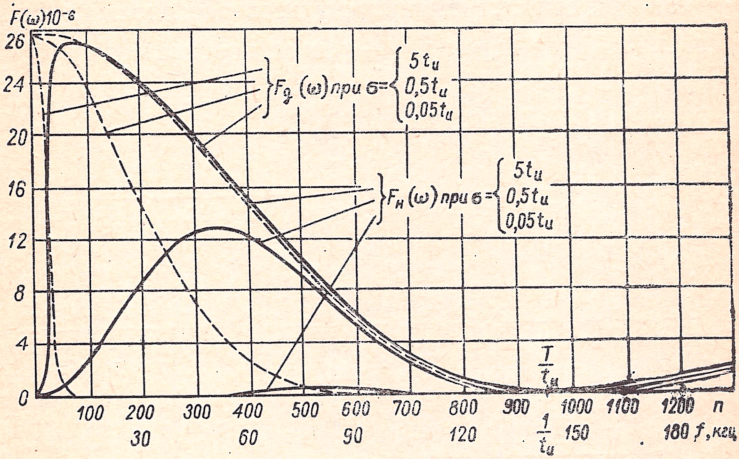


Рис. 30. Амплитудная структура составляющих энергетического спектра последовательности одинаковых импульсов, имеющих случайное время появления.

функции распределения случайных отклонений момента появления импульсов относительно среднего значения частоты следования импульсов;

3) структура дискретной части спектра определяется законом дельта-функции и представляет собой бесконечный ряд гармоник n, кратных нечетным значениям средней частоты повторения импульсов, т. е. $\frac{n}{T} = 150, 450; 750$ *гц* и т. д.

СЛУЧАЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСОВ, ОБЛАДАЮЩИХ СЛУЧАЙНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ

Рассмотрим последовательность равноотстоящих импульсов прямоугольной формы, имеющих одинаковую амплитуду U_0 и случайную длительность $\tau(t)$, относительно принятой системы отсчета времени — кривой напряжения

промышленной частоты (рис. 31). Пусть $g\ (\omega, \tau_0)$ есть спектральная плотность импульса, появляющегося в момент времени $t = 0$. Для p-го импульса, обладающего случайной длительностью τ_p, энергетический спектр

$$F_p(\omega) = g(\omega, \tau_p).$$

Так как оси симметрии импульсов расположены через равные интервалы времени $\frac{T}{2}$ и их отклонение ν от тактового

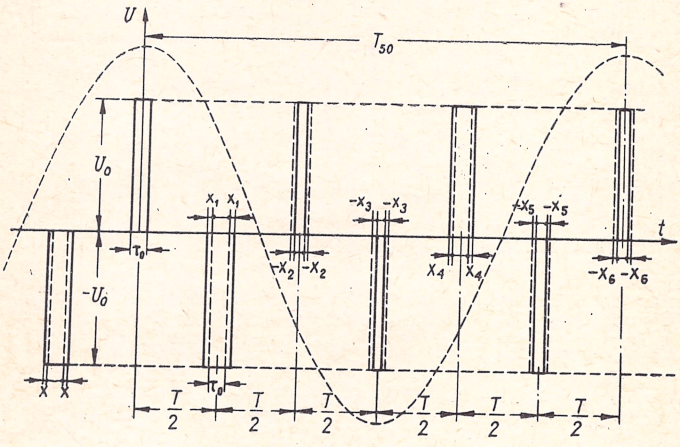


Рис. 31. Периодическая последовательность импульсов, обладающих одинаковой амплитудой и случайной длительностью.

интервала равно нулю, то спектральная плотность p-го импульса

$$V_p = F_p(\omega)\, e^{i\omega\nu} = g(\omega, \tau_p). \tag{47}$$

Применяя метод усреднения случайных величин в соответствии с выражениями (12)—(14), (18)—(20) и (47), получаем

$$K(\omega) = m_1\{[g(\omega, \tau_p)]^2\}.$$

Если принять одномерную функцию распределения случайных длительностей импульсов $W_1(\tau)$ одинаковой для всех импульсов, то

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} [g(\omega, \tau)]^2 W_1(\tau)\, d\tau. \tag{48}$$

Считая длительность любой пары импульсов $p - i$ взаимно независимыми, на основании выражений (21) и (22) находим

$$H_{p-i}(\omega) = m_1\{g(\omega, \tau_p)\, g(\bar{\omega}, \bar{\tau}_i)\} = \left[\int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, \tau)\, W_1(\tau)\, d\tau\right]^2 = [H(\omega)]^2, \quad (49)$$

где $H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\omega, \tau)\, W_1(\tau)\, d\tau$.

Поэтому энергетический спектр рассматриваемой последовательности импульсов определяется выражением (25).

Изобразим в относительных единицах спектральную структуру составляющих периодической последовательности импульсов, имеющих, например, двухстороннюю модуляцию по длительности белым шумом. Считаем, что фронты и срезы импульсов, модулированных белым шумом, сдвигаются в противоположные стороны от оси импульса симметрично. Обозначим через τ_0 длительность немодулированного импульса в начальный момент времени и через $W_1(x)$ — функцию распределения случайных отклонений длительности импульсов относительно величины $\frac{\tau_0}{2}$. С учетом принятых условий спектральная плотность любого импульса

$$g(\omega, \tau_p) = U_0 \int_{-\frac{\tau_0}{2}-x}^{\frac{\tau_0}{2}+x} e^{j\omega t} dt = \frac{U_0}{j\omega}\left(e^{\frac{j\omega\tau_0}{2}} e^{j\omega x} - e^{\frac{j\omega\tau_0}{2}} e^{-j\omega x}\right). \quad (50)$$

На основании уравнения (50) и (43) выражения (48) и (49) принимают следующий вид:

$$K(\omega) = \frac{U_0^2}{\omega^2}[2 - \Theta(2\omega)\, e^{j\omega\tau_0} - \Theta(-2\omega)\, e^{-j\omega\tau_0}];$$

$$[H(\omega)]^2 = \frac{U_0^2}{\omega^2}\{2[\Theta(\omega)]^2 - \Theta^2(\omega)\, e^{j\omega\tau_0} - \Theta^2(-\omega)\, e^{-j\omega\tau_0}\}.$$

Так как при симметричной двухсторонней модуляции импульсов по длительности характеристическая функция четная, то

$$K(\omega) = \frac{2U_0^2}{\omega^2}[1 - \Theta(2\omega)\cos\omega\tau_0];$$

$$[H(\omega)]^2 = \frac{2U_0^2}{\omega^2}\{[\Theta(\omega)]^2 - \Theta^2(\omega)\cos\omega\tau_0\}.$$

Учитывая эти уравнения, на основании выражения (25) энергетический спектр рассмотренной последовательности импульсов, промодулированных по длительности «белым» шумом,

$$F(\omega) = \frac{4 \cdot 2U_0^2}{T\omega^2}\left\{1 - \Theta(2\omega)\cos\omega\tau_0 - [\Theta(\omega)]^2 + \Theta(\omega)\cos\omega\tau_0 + \right.$$

$$\left. + \frac{2\pi}{T}[\,|\,\Theta(\omega)\,|^2 - \Theta^2(\omega)\cos\omega\tau_0] \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)\right\},$$

или

$$F(\omega) = \frac{8U_0^2}{\omega^2 T}\left\{(1 + e^{-\sigma^2\omega^2}\cos\omega\tau_0)(1 - e^{-\sigma^2\omega^2}) + \right.$$

$$\left. + \frac{4\pi}{T} e^{-\sigma^2\omega^2}\sin^2\frac{\omega\tau_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right)\right\},$$

где

$$F_н(\omega) = \frac{8U_0^2}{\omega^2 T}\{(1 + e^{-\sigma^2\omega^2}\cos\omega\tau_0)(1 - e^{-\sigma^2\omega^2})\}; \qquad (51)$$

$$F_д(\omega) = \frac{32\pi U_0^2}{\omega^2 T^2} e^{-\sigma^2\omega^2}\sin^2\frac{\omega\tau_0}{2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega - \frac{2\pi n}{T}\right). \qquad (52)$$

В выражениях (51) и (52) параметр σ означает среднее квадратическое отклонение случайной длительности импульсов относительно величины τ_0, имеющей нулевое среднее значение.

Для построения амплитудной структуры энергетического спектра рассмотренной последовательности импульсов в относительных единицах приняты следующие данные: $U_0 = 1$; $\tau_0 = t_и = 7 \cdot 10^{-6}$ *сек*; среднеквадратическое значение случайных отклонений длительности импульсов относительно величины $\frac{\tau_0}{2}$ соответствует $\sigma_1 = 0{,}05$; $\sigma_2 = 0{,}5$ и $\sigma_3 = 5$. Результаты вычислений показаны в виде кривых на рис. 32.

Анализ структуры составляющих периодической последовательности импульсов, обладающих одинаковой амплитудой и случайной длительностью показал, что спектр состоит из непрерывной и дискретной части. Члены, содер-

жащие дельта-функцию, образуют бесконечный ряд дискретных составляющих с частотами 150, 450, 750 *гц* и т. д. Так как в выражении (52) параметр σ входит в качестве показателя степени, небольшие отклонения длительности импульсов от ее средней величины вызывают значительное преобладание составляющих сплошного спектра (рис. 32).

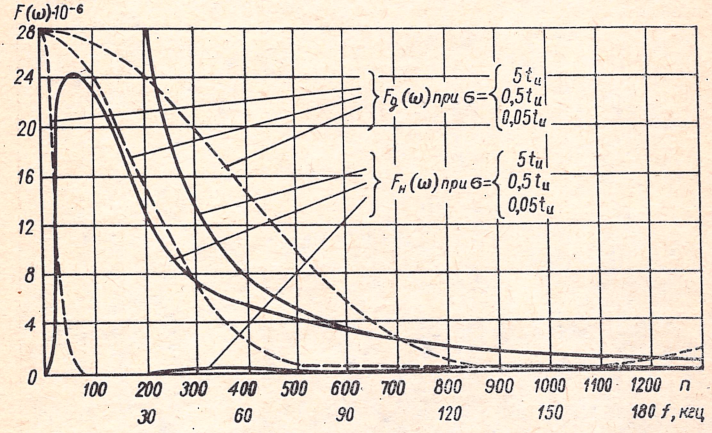


Рис. 32. Амплитудная структура составляющих энергетического спектра периодической последовательности импульсов одинаковой амплитуды и случайной длительности при различной величине среднеквадратического отклонения длительности импульсов.

В приложении к действительной трехфазной сети это значит, что незначительные колебания длительности импульсов вызывают преобладание составляющих сплошного спектра. Поскольку в настоящее время не имеется сведений о степени изменения длительности зарядных импульсов, поэтому о соотношении сплошного и дискретного спектров можно сделать заключение лишь по экспериментальным данным.

7. ПОМЕХИ НА ВЫХОДЕ ПРИЕМНИКА ОТ ИЗОЛЯТОРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ

Осциллографирование помех на выходе детектора избирательного приемника «Tekade» производилось на различных частотах настройки. Осциллограммы напряжения помех на выходе приемника, подключенного к устройству присоединения линий 35, 6—10 и 0,4 *кв* показаны на

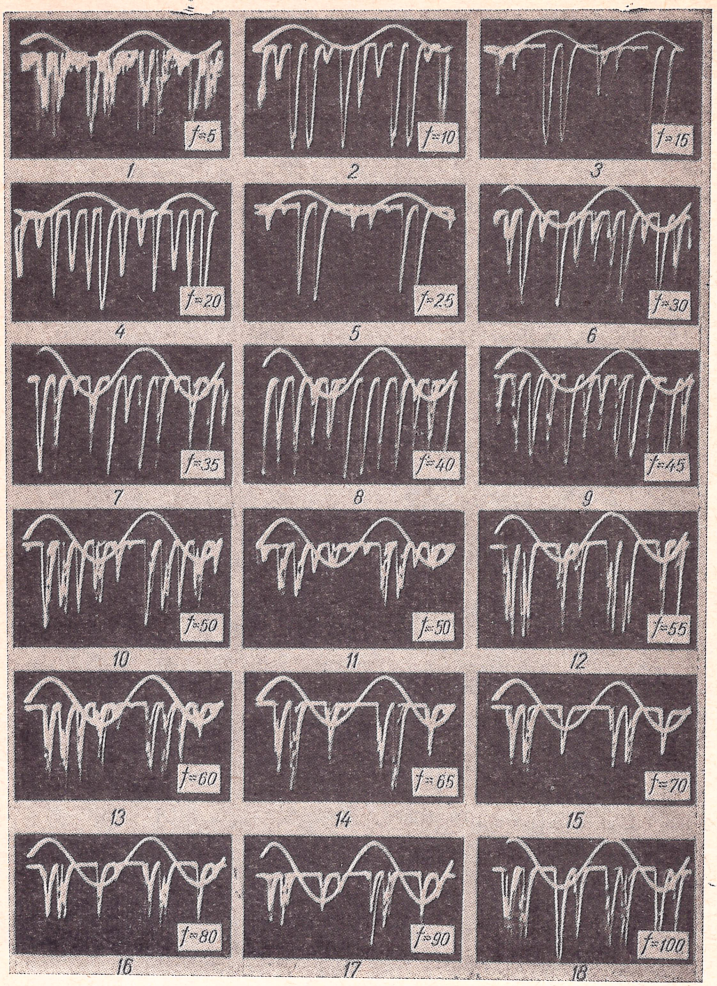
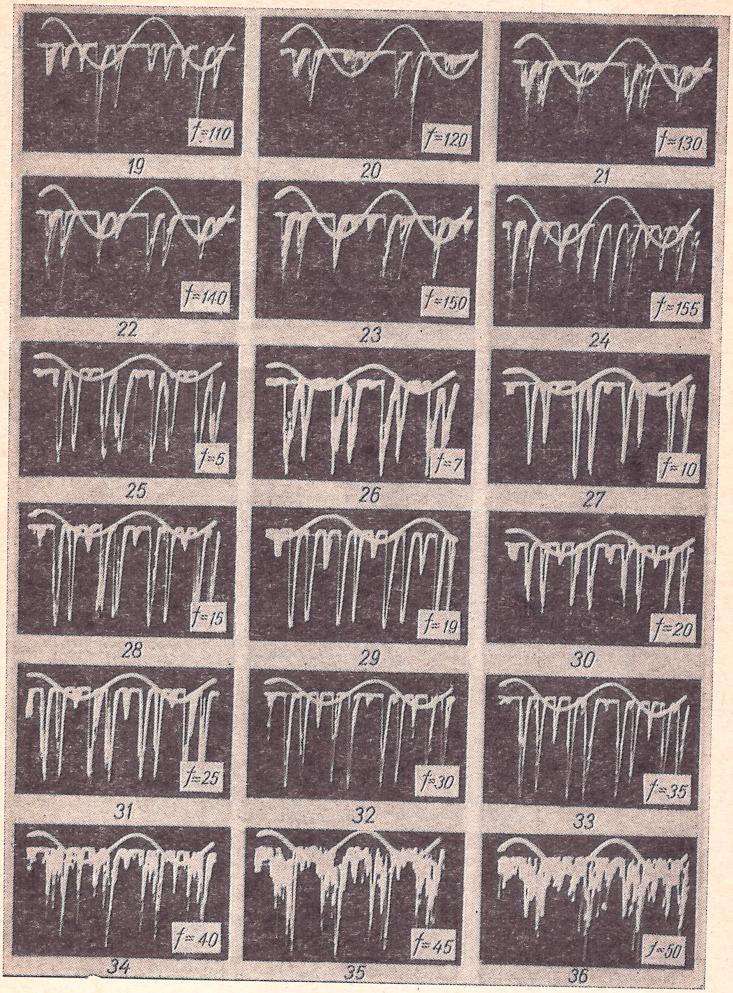


Рис. 33. Осциллограммы напряжения помех на выходе приемника от *1—24* — сеть 35 *кв*, схема «фаза—земля» (п/ст Томаковка, Днепропетровской 0,4 *кв*, схема «фаза—земля» (с. Беленькое, Запорожской области). Частота *f*

рис. 33. На каждой осциллограмме приведена частота настройки избирательного приемника в килогерцах.

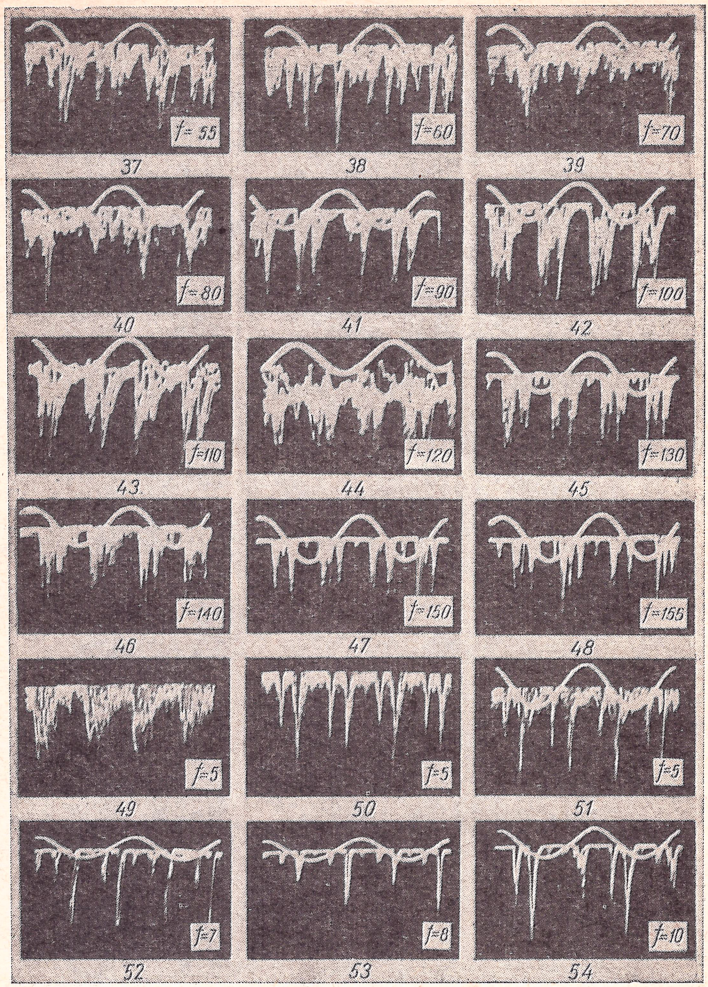
Приведенные осциллограммы наглядно иллюстрируют тот факт, что каждому периоду напряжения 50 *гц* соответствует шесть импульсов, регулярность появления которых



носительно кривой 50 *гц*:

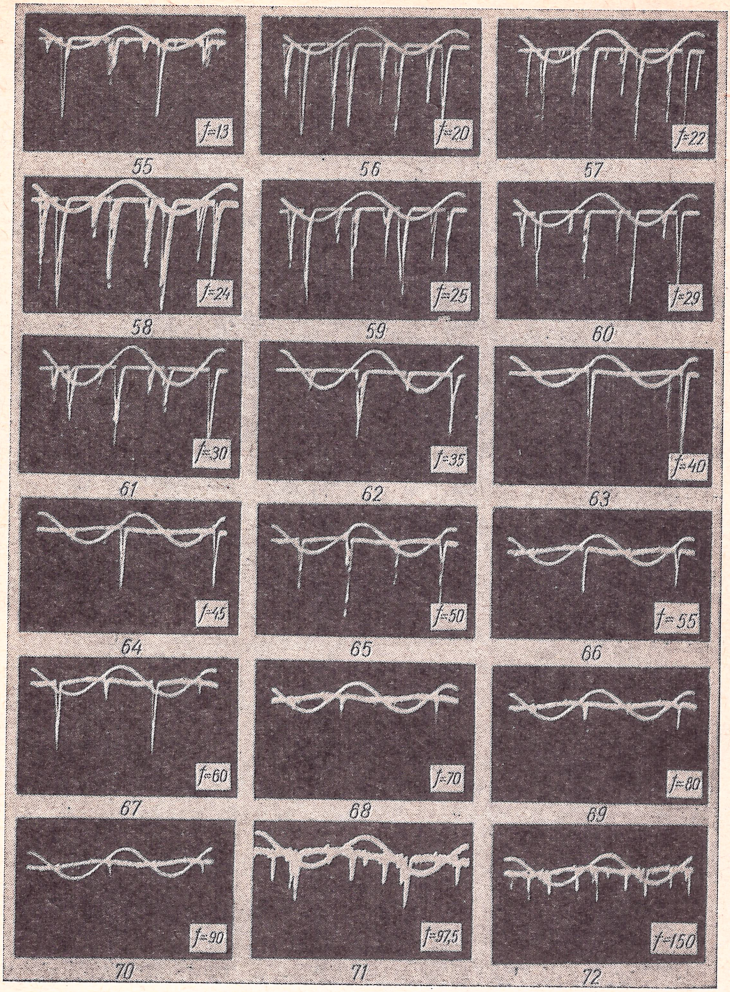
области; *25—48* — сеть 6 *кв*, схема «фаза — фаза» (о. Хортица); *49—72* — сеть дана в *кгц*.

обусловлена периодичностью максимумов 50-периодного напряжения в линии. Поэтому частота следования импульсов на выходе приемника, составляя приблизительно $\frac{1}{6} T_{50}$, незначительно колеблется около 300 *гц* [27].



При схеме измерения «фаза — земля» обычно наблюдается чередование одного большого импульса и двух несколько меньших (осц. *4*). При схеме «фаза — фаза» после двух импульсов с большой амплитудой следует один импульс с малой амплитудой.

Амплитуда импульсов в течение времени изменяется хаотически, однако указанное выше чередование амплитуд является устойчивым. Наибольшая амплитуда, как прави-



ло, соответствует отрицательной полуволне напряжения в линии и реже — положительной. Это соответствие не является устойчивым для каких-либо определенных частот. Замечено, что на одной и той же частоте настройки приемника максимальные импульсы могут соответствовать то одной полярности высокого напряжения, то противоположной. Для иллюстрации этого явления сделана запись импульсов относительно трехфазной системы напряжения в

течение длительного времени (рис. 34). Приемник, настроенный на частоту 16,5 *кгц*, подключался к устройству присоединения 6 *кв* по схеме «фаза — земля». С выхода детектора приемника ток помех подавался на шлейфовый осциллограф типа МПО-2 и записывался вибратором, потреблявшим ток около 2 *ма* (см. рис. 14). Такие осциллограммы позволили обнаружить плавный характер изменения амплитуд импульсов при переходе от одного состояния к другому,

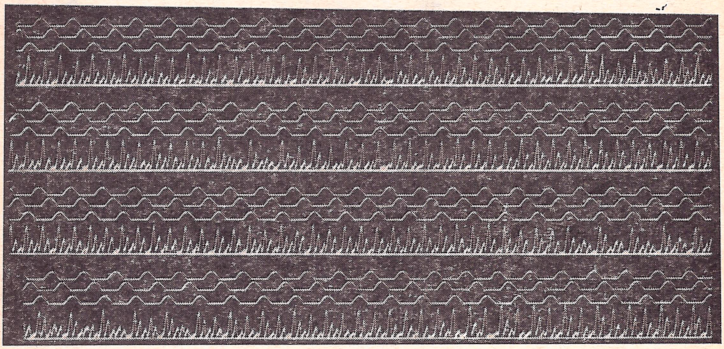


Рис. 34. Осциллограмма изменения во времени напряжения импульсов на выходе приемника относительно полярности высокого напряжения в линии. Частота настройки приемника $f=16{,}5$ *кгц*.

чего нельзя заметить с помощью осциллографа с периодической разверткой. При изменении амплитуд импульсов от одного соотношения к другому наблюдаются устойчивые состояния, продолжительность которых составляет десятые доли секунды при устойчивой сухой погоде и сотые доли секунды при изменении погоды (утром при ветре). Осциллограмма на рис. 34 показывает переход от одного состояния, когда максимальные импульсы появляются за положительную полярность напряжения в линии, к состоянию их появления за отрицательную полярность.

По осциллограммам рис. 33 видно, что с увеличением частоты составляющих их амплитуда уменьшается. Этой закономерности соответствует спад кривой уровня помех на рис. 37. В сетях 0,4 *кв* спад амплитуд импульсов с увеличением частоты происходит более резко, чем в сетях 6, 10 и 35 *кв*.

В сетях 0,4 *кв* на частотах более 30 *кгц* помехи от изоляторов определяются, в основном, импульсами, возника-

ющими в изоляторах той фазы, к которой подключено устройство присоединения. Влияние частичных разрядов в изоляторах других фаз линии незначительно, так как оно несоизмеримо с собственными импульсами на данной фазе. Вследствие этого вместо шести импульсов за каждый период 50 *гц* наблюдается или по два импульса, возникающих от обеих полуволн (осц. *52—55*, *62*, *65*, *67*, *71*), или по одному импульсу за период (осц. *63*, *64*, *66*, *68—70*).

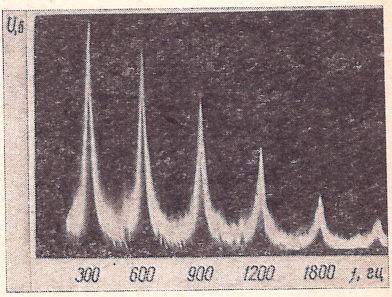


Рис. 35. Спектрограмма помех на выходе приемника при погоде «сухо».

Приведенные экспериментальные данные показывают, что качественные признаки помех на выходе приемника: их характер, форма кривой напряжения, частота следования импульсов, соотношение их амплитуд и т. д.— одинаковы для всех сетей, независимо от уровня напряжения. Следовательно, изучение колебаний на выходе приемника обнаружило однотипность помех в воздушных сетях 0,4, 6, 10 и 35 *кв*, подтверждающую одинаковую природу их происхождения.

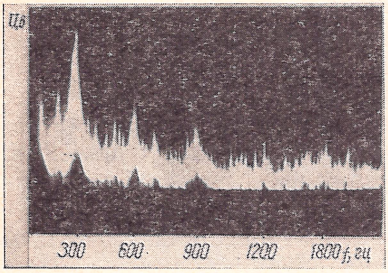


Рис. 36. Спектрограмма помех на выходе приемника при погоде «сыро».

Благодаря исследованию спектрального состава импульсов на выходе приёмника выявлены следующие закономерности:

1. При нормальных атмосферных условиях, когда на выходе приемника наблюдается обычная система импульсов с частотой следования 300 *1/сек* (рис. 33) спектр помех состоит из составляющих с частотами 300, 600, 900 *гц* и т. д. Типичная спектрограмма составляющих указанных импульсов показана на рис. 35.

2. При значительных колебаниях амплитуды импульсов на выходе приемника или нерегулярном их следовании спектральные линии на экране анализатора, соответствующие

частотам 300, 600, 900 *гц* и т. д., резко уменьшаются по высоте, расширяясь вплоть до взаимного слияния. В этом случае получается сплошной спектр помех, показанный на рис. 36.

В заключение следует отметить, что наличие на выходе приемника импульсов, следующих с частотой 300 *гц*, свидетельствует о существовании в ЛЭП своеобразного спектра составляющих импульсного характера. Составляющие этого спектра можно представить как гармонические колебания, промодулированные частотой 300 *1/сек*. Поэтому импульсы на выходе приемника амплитудно-модулированных колебаний расположены через частотный интервал 300 *гц*.

Приведенные экспериментальные данные о помехах на выходе приемника подтверждают рассмотренные выше представления о существовании системы импульсов от частичных разрядов на изоляторах трехфазной линии.

8. УРОВЕНЬ ПОМЕХ ОТ ИЗОЛЯТОРОВ И ДРУГИХ ИСТОЧНИКОВ В ЛИНИЯХ 0,4—35 *кВ*

Величина напряжения помех зависит от класса напряжения сети и атмосферных условий. Указанная зависимость в линиях 0,4, 6, 10, 35 *кв* изучалась методом массовых замеров уровня на различных частотах. Чтобы отличить помехи, обусловленные изоляторами линии, от мешающих колебаний иного происхождения, на выход измерителя помех подключался электронный осциллограф, с помощью которого по форме кривой напряжения легко обнаружить присутствие помех от других источников.

Типичные кривые уровня помех в зависимости от частоты настройки избирательного приемника показаны на рис. 37. Пунктирной кривой на графиках изображен наиболее вероятный уровень помех от изоляторов, установленный на основе большого числа измерений (табл. 1). Представленные здесь средние арифметические величины уровня помех соответствуют общеизвестной закономерности уменьшения напряжения помех с ростом частоты.

Подъем кривых в области частот 8—15 *кгц* вызван резонансными свойствами устройств присоединения [37], а на частотах 16—19 *кгц* — резонансными свойствами самой линии.

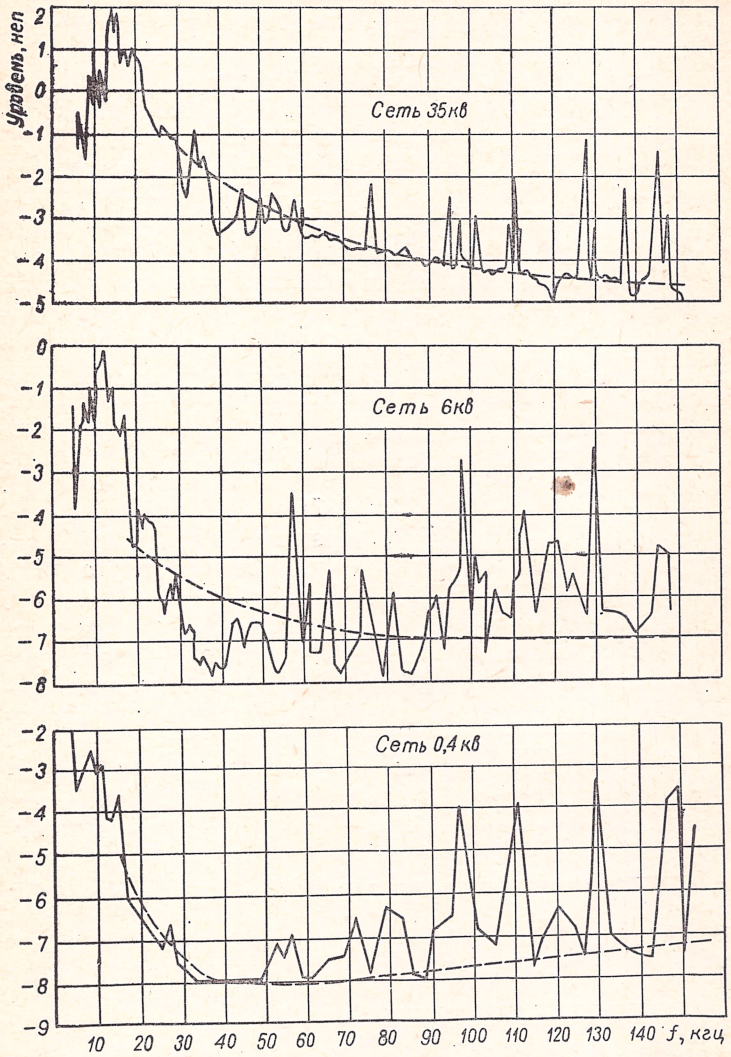


Рис. 37. Кривые уровня помех на выходе приемника для полосы $\Delta f = 5$ *кгц* при погоде «сухо» для схемы «фаза — земля».

Таблица 1

Уровень помех, *неп*, для полосы 5 *кгц* на $k = 600$ *ом*

Напряжение линии, *кв*	Условия погоды	Частота, *кгц*													
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	140	150
35	Сухо	+0,4	—1,3	—2,0	—2,6	—3,2	—3,5	—3,8	—4,0	—4,2	—4,3	—4,4	—4,6	—4,7
	Дождь	+2,0	—0,7	—1,5	—2,2	—2,7	—3,0	—3,2	—3,3	—3,3	—3,4	—3,5	—3,5	—3,5
	Туман	+2,1	—0,6	—1,4	—1,9	—2,4	—3,0	—3,0	—3,2	—3,3	—3,5	—3,5	—3,5	—3,5
6	Сухо	—4,8	—5,5	—6,0	—6,3	—6,5	—6,7	—6,9	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0
	Дождь	—4,3	—6,0	—6,4	—6,6	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7	—6,7
	Туман	—4,2	—5,2	—5,8	—5,9	—6,0	—6,0	—6,1	—6,1	—6,2	—6,2	—6,3	—6,4	—6,4
0,4	Сухо	—6,3	—7,5	—8,0	—8,0	—8,0	—7,9	—7,9	—7,8	—7,7	—7,6	—7,5	—7,4	—7,3
	Дождь	—4,5	—5,9	—6,8	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,0	—7,1	—7,1
	Туман	—4,3	—5,2	—5,7	—5,9	—6,0	—6,1	—6,1	—6,1	—7,1	—7,1	—6,1	—6,0	—6,0

Резкие подъемы кривой на отдельных частотах обусловлены помехами от местных радиопередатчиков. В сетях Запорожской и Днепропетровской областей они занимают частоты 34, 45, 55, 58, 5, 67,74—78, 80, 96—98, 102, 111—112, 120—122, 128—130, 138, 145—149 *кгц* и т. д. На некоторых частотах наблюдаются провалы кривой уровня помех, обусловленные действием отраженных волн в коротких ответвлениях линии [1, 34, 38 и др.]. Такое явление имеет место в области частот 40 и 120 *кгц* (рис. 37) и особенно ярко выражено на коротких линиях, имеющих затухание до 1,5 *неп*.

Осциллограммами (рис. 33) было показано, что рассматриваемая область частот заполнена импульсными помехами от изоляторов. Следовательно, пунктирные кривые на рис. 37 обусловливаются интенсивностью частичных разрядов на изоляторах линии.

Для импульсных помех от изоляторов в сетях 35 *кв* характерно плавное спадание кривой уровня по мере увеличения частоты. При погоде «сухо» величина его убывает от —3 *неп* на частоте 40 *кгц* до

—4,7 *неп* на частоте 155 *кгц* (рис. 37). При тумане и дожде уровень помех выше, приблизительно, на 1 *неп*.

В сетях 6—10 *кв* уровень импульсных помех с ростом частоты падает значительно быстрее (рис. 37). Начиная с 40 *кгц*, заметную величину имеют модулированные колебания с программами местных радиопередатчиков. Вследствие этого кривая уровня помех, не имея плавного спада с увеличением частоты, как в сетях 35 *кв*, приобретает характер резких подъемов на отдельных частотах. Это явление находит свое отражение и на осциллограммах *25—48* (рис. 33), где на частотах до 40 *кгц* помехи имеют обычную форму импульсов, а на частотах более 40 *кгц* импульсы значительно усложняются за счет наложения колебаний, происходящих от радиопередатчиков. На осциллограмме *44* (рис. 33) зафиксирована типичная помеха от радиопередатчика на частоте 120 *кгц*, обладающая более высоким уровнем, чем импульсные помехи от изоляторов. Смещение кривой суммарного напряжения помех относительно линии нулевых значений напряжения, т. е. относительно оси кривой 50 *гц*, указывает на то, что данная помеха содержит, кроме того, немодулированные колебания. Во время перерыва в работе радиостанции на той же частоте наблюдается обычная картина импульсных помех невысокого уровня.

При сухой погоде уровень импульсных помех от изоляторов в сетях 6 *кв* составляет —6 *неп* на частоте 40 *кгц* и снижается до —7 *неп* на частоте 155 *кгц*. При дожде и тумане он повышается на 1,3—1,7 *неп*. В сетях 10 *кв* уровень помех выше указанных значений на величину 0,5—0,8 *неп*.

В сетях 0,4 *кв* наблюдается еще более быстрый спад уровня импульсных помех с увеличением частоты (рис. 37). При сухой погоде он изменяется от —3,5 *неп* на частоте 10 *кгц* до —8 *неп* на частоте 35 *кгц*, а при дожде и тумане возрастает на 1,5—2 *неп*. Начиная с частоты 35 *кгц* над импульсными помехами, как правило, преобладают модулированные колебания радиовещания, вызывающие перепады уровня от —3,5 до —7,5 *неп*.

В процессе измерений накоплено большое количество данных о величине помех в сельских распределительных сетях 0,4—35 *кв* при различных условиях погоды. Систематизация и обработка этих данных дает возможность рекомендовать для расчета высокочастотных каналов по проводам сельских сетей уровни помех, приведенные в табл. 1. При этом необходимо также учитывать помехи от местных

радиопередатчиков, о чем будет сказано в гл. IV. Для практического использования этих данных требуется знать не только уровень, но и спектральную структуру помех на определенных частотах, что особенно важно при конструировании аппаратуры телемеханики и телефонной связи. В связи с этим была поставлена задача определения границы диапазона частот, в котором уровень импульсных помех от частичных разрядов является преобладающим. Верхняя граница диапазона, где импульсные помехи от изоляторов преобладают над модулированными колебаниями радиопередатчиков , зависит от местных факторов: расстояния до местных радиовещательных станций, мощности радиопередатчиков.

Таблица 2

Диапазоны преобладания помех с различной структурой колебаний в сетях 35, 10, 6 и 0,4 *кв*

Напряжение сети, *кв*	Частота, *кгц*		
	Гармоники напряжения 80 *гц* и комбинационные составляющие, не более	Импульсные помехи от частичных разрядов на изоляторах	Модулированные сигналы от местных радиопередатчиков, более
35	10	12—90	95
10	5	7—50	60
6	4	5—40	50
0,4	3	4—30	40

Приводимые в табл. 2 данные для сетей 0,4—35 *кв* установлены по результатам измерений в Запорожской и Днепропетровской областях. Аналогичные измерения, проведенные в Ставропольском крае, не обнаружили существенного изменения этих границ. Нижняя граница указанных диапазонов частот, где импульсные помехи преобладают над немодулированными колебаниями (комбинационными составляющими) установлена по осциллограммам помех на выходе избирательного приемника (рис. 33). Так на осциллограммах *1—14*, *25—35*, *52—54*, *56*, *58*, *60*, *64*, *65* можно заметить вертикальное смещение нулевых значений кривой напряжения помех относительно оси 50-периодной кривой. Сущность такого смещения заключается в наличии постоянных по амплитуде колебаний, попадающих в полосу пропускания приемника. Экспериментальным путем установлено, что эти немодулированные колебания представляют комбинацион-

ные составляющие, о которых будет сказано в гл. III. По величине смещения на осциллограммах (рис. 33) можно ориентировочно определить соотношение напряжения импульсных помех и немодулированных колебаний. Учитывая ничтожное затухание импульсных помех в устройстве присоединения, эквивалентное затуханию частот в сотни килогерц, и значительное затухание в нем низкочастотных гармонических колебаний (см. рис. 15), можно ориентировочно установить, что на частоте 5 *кгц* амплитуда напряжения немодулированных колебаний в линии в 15 раз больше, чем их величина, определяемая по смещению на осциллограммах, на частоте 10 *кгц* — в 5,5 раза, на частоте 20 *кгц* — в 3 раза, на частоте 40 *кгц* — в 1,6 раза и на частоте 60 *кгц* — в 1,2 раза.

Таким образом установлено, что немодулированное напряжение комбинационных составляющих в сетях 35 *кв* обнаруживается в диапазоне частот до 60 *кгц*, однако их преобладание над импульсными помехами наблюдается только лишь до 8—10 *кгц*. На частотах 9—12 *кгц* немодулированные колебания соизмеримы с импульсными помехами.

В сетях 6—10 *кв* немодулированные составляющие обнаруживаются в диапазоне частот до 45 *кгц*. Их преобладающее значение наблюдается на частотах до 4—5 *кгц*, а граница области, где немодулированные колебания соизмеримы с импульсными помехами, находится на частотах 5—7 *кгц*.

В сетях 0,4 *кв* присутствие немодулированных колебаний обнаруживается в диапазоне частот до 25 *кгц*. Их напряжение соизмеримо с импульсными помехами на частотах 3,5—4 *кгц* и преобладает на частотах до 3 *кгц*.

Те же результаты в определении нижней границы области преобладания импульсных помех получены с помощью анализатора спектра типа АСЧХ-1. Спектрограммы помех, сделанные в диапазонах 0,2—5 и 0,4—20 *кгц*, наглядно показывают различие спектральной структуры составляющих в области нижних и верхних частот (рис. 38). Спектрограмма рис. 38, *а* представляет типичную структуру комбинационных составляющих, расположенных группами по две с интервалом 100 *гц* между ними и 200 *гц* между группами. Спектрограмма рис. 38, *б*, сделанная в диапазоне 0,4—20 *кгц*, показывает, что на частотах более 10 *кгц* составляющие обладают иной частотной структурой, располагаясь через интервалы 300 *гц* (ранее было показано, что

такой интервал имеют составляющие, происходящие от совокупности частичных разрядов на изоляторах трехфазной сети). Граница между составляющими со структурой

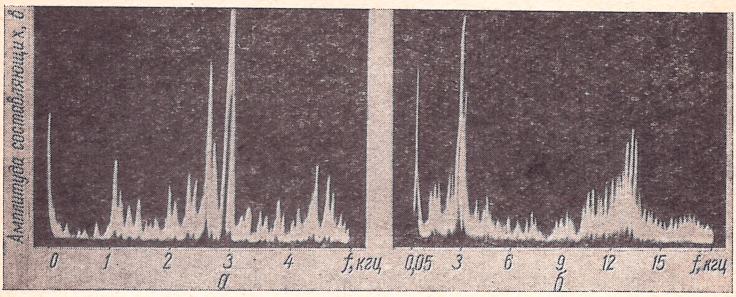


Рис. 38. Спектрограммы, обнаруживающие преобладание помех со структурой:

а — комбинационных составляющих на нижних частотах; *б* — составляющих от частичных разрядов на изоляторах в области верхних частот. Сеть 35 *кв*, схема «фаза—земля»

первого и второго видов заметна на спектрограмме рис. 38,*б* по нарушению интервала 300 *гц* между спектральными линиями на частотах менее 9 *кгц*.

9. ОСОБЕННОСТИ ПОМЕХ ОТ ИЗОЛЯТОРОВ И МЕТОДЫ ИХ УЧЕТА В УСТРОЙСТВАХ СВЯЗИ

На основании вышеизложенных материалов о природе возникновения мешающих колебаний от изоляторов и их спектральной структуре становится ясным отличие высокочастотных колебаний в сетях 0,4—35 *кв* от колебаний в линиях более высоких классов напряжения.

По сравнению с помехами в линиях электропередачи более высокого класса напряжения помехи в сетях 0,4—35 *кв* отличаются не только меньшим уровнем напряжения, но и иными качественными признаками. В частности, помехи в сетях 0,4—35 *кв* имеют периодический характер следования серий импульсов в то время как в сетях более высокого напряжения имеют место непрерывные помехи. В рассмотренных сетях каждому периоду напряжения 50 *гц* соответствует шесть отдельных серий импульсов, происходящих от частичных разрядов на изоляторах линии, а в сетях более

высокого напряжения каждому периоду 50 *гц* соответствует три всплеска гладких помех, обусловленных коронными разрядами. В сетях 0,4—35 *кв* серии импульсов следуют синхронно с максимумами фазного напряжения обеих полярностей, а в сетях более высокого напряжения всплески помех соответствуют положительной полярности линейного напряжения.

Форма помех в виде шести серий импульсов за период 50 *гц* является устойчивой при значительных изменениях атмосферных условий. В зависимости от состояния окружающей среды число импульсов в каждой серии изменяется от 1 до 2 в сетях 0,4 *кв*, от 1 до 4 в сетях 6—10 *кв* и от 5 до 9 в сетях 35 *кв*, увеличиваясь при ухудшении погоды. При появлении тумана, росы или дождя импульсы помех возникают при максимумах как фазного, так и линейного напряжения, поэтому число серий за каждый период 50 *гц* увеличивается. Система помех в виде 12 серий импульсов за период является неустойчивой. При продолжительной сырой погоде она сменяется устойчивой формой сплошных импульсов, пульсирующих с удвоенной частотой сети.

Периодическая природа возникновения частичных разрядов на изоляторах синхронно с максимумами фазного напряжения линии определяет дискретную структуру спектра импульсных помех, состоящего из бесконечного ряда составляющих с частотами 150, 450, 750 *гц* и т. д. Амплитудную структуру спектра определяет длительность каждого импульса и их количество в серии. Колебания амплитуды импульсов в серии около некоторого среднего значения и, особенно, колебания длительности и момента появления импульсов вызывают образование составляющих сплошного спектра. В зависимости от величины среднеквадратического отклонения указанных параметров от их средних значений составляющие сплошного спектра в большей или меньшей степени сосредоточиваются около составляющих дискретного спектра.

Импульсные помехи от линейных изоляторов трехфазной сети создают на выходе приемника амплитудно-модулированных сигналов периодические импульсы с частотой следования 300 1/*сек*, проявляющиеся в виде помех на частотах 300, 600, 900 *гц* и т. д.

Размещение рабочих частот каналов телемеханики в полосе частот телефонного канала

При проектировании каналов телемеханики, работающих по высокочастотному телефонному каналу, организованному по проводам высоковольтной линии, необходимо учитывать структуру импульсных помех от изоляторов. Мешающее действие указанных помех можно избежать путем размещения рабочей полосы частот каналов телемеханики между частотами 300, 600, 900 *гц* и т. д., а полос разделительных фильтров — на частотах этих гармоник.

Наиболее ответственные каналы телемеханики следует размещать в верхней части передаваемой полосы частот телефонного канала, где амплитуда мешающих колебаний минимальна.

Выбор вызывных частот телефонного канала с тональной системой вызова

При конструировании высокочастотной телефонной аппаратуры, предназначенной для работы по проводам высоковольтных линий, необходимо учитывать, что напряжение помех с наибольшей амплитудой находится в нижней части передаваемого спектра на частотах 300, 600, 900 *гц* и т. д.

В связи с этим тональные вызывные частоты телефонного канала необходимо размещать в верхней части передаваемой полосы частот, где вероятность ложного вызова в результате помех является минимальной.

Расчетный уровень

При проектировании высокочастотных телефонных каналов по проводам электрических линий 0,4—35 *кв* рекомендуется для каждой частоты принимать в качестве расчетного уровня помех величины, приведенные в табл. 1.

III. ПОМЕХИ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ ОТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЯ

Существовавшее представление о гармонических составляющих напряжения справедливо только лишь для генератора без нагрузки. При подключении генератора к электрической сети через трансформатор амплитудная структура составляющих напряжения становится иной за счет возникновения в трансформаторе колебаний комбинационных частот [29, 36].

Причина столь существенного отличия амплитудной структуры спектра напряжения в ЛЭП от структуры спектра напряжения генератора не выяснена, однако в работе [6] высказано предположение о возможности сложного преобразования спектра гармонических составляющих напряжения генераторов в нелинейной магнитной системе трансформатора.

Вопрос трансформации спектра напряжения генератора до сих пор не рассматривался, так как для энергоснабжения он не имеет сколько-нибудь существенного значения. За последние годы в некоторых странах, особенно во Франции, Англии, Швейцарии и ФРГ, в связи с массовым использованием электрических линий для телеуправления элементами электрической сети [54, 77], весьма эффективно применяются низкие частоты (область десятков и сотен герц). Поэтому возникла потребность более детального изучения спектральной структуры колебаний в ЛЭП, происходящих от взаимодействия гармонических составляющих напряжения генератора в нелинейной магнитной системе трансформатора.

10. ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Генераторы электрических станций никогда не вырабатывают чисто синусоидальной формы напряжения. Согласно существующего ГОСТа форма напряжения промышленной частоты считается практически синусоидальной, если разница между любой ее ординатой U_1 и соответствующей ординатой U'_1 основной гармоники составляет не

более 5% амплитудного значения основной синусоиды, т. е.

$$\frac{U_1 - U_1'}{U_{\text{макс}}} \cdot 100\% \leqslant 5\%.$$

Синусоидальную форму напряжения достигнуть технически трудно. Получение идеальной формы напряжения силового генератора связано с неоправданными затратами, поэтому вырабатываемое электростанциями напряжение всегда в какой-то мере отличается от синусоиды. Будучи периодической функцией $f(t)$ с периодом 2π и обладая зеркальной симметрией

$$f(t + \pi) = -f(t),$$

такое напряжение содержит гармонические составляющие нечетной кратности. Амплитуда напряжения гармоник убывает по мере увеличения порядка составляющей согласно разложению кривой в ряд Фурье.

Энергетики, как правило, обращают внимание на величину напряжения первых гармонических, пренебрегая сравнительно малой величиной остальных составляющих. Однако составляющие более высокого порядка представляют основное препятствие для организации по проводам электрических линий каналов телефонии и телемеханики.

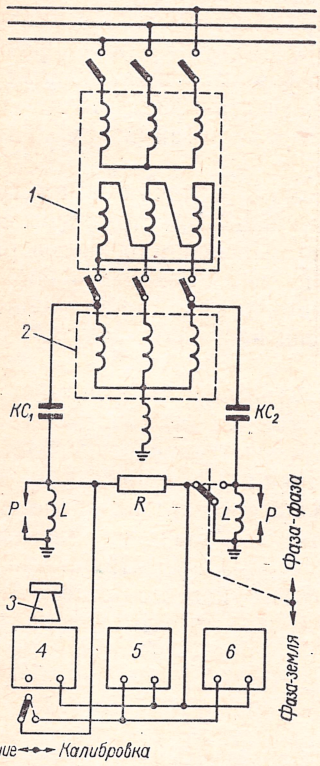


Рис. 39. Схема присоединения измерительной аппаратуры к шинам высокого напряжения:

1 — группа однофазных трансформаторов 90 *Мва*, 154/13,8 *кв*; *2* — синхронный генератор 72 *Мва*, 13,8 *кв*; *3* — фотоприставка; *4* — анализатор спектра типа АСЧХ-1; *5* — калибровочный генератор типа ЗГ-10; *6* — ламповый вольтметр типа ВКС-7Б, *КС* — конденсатор связи типа СМ-70: *Р* — разрядник; *L* — заземляющий дроссель с индуктивностью 50 *мгн*; *R* — нагрузочное сопротивление 600 *ом*.

Для изучения возможностей использования тонального диапазона частот для телемеханических каналов связи, осуществляемых по проводам распределительных сетей 0,4—35 *кв*, были проведены исследования низкочастотных помех как на шинах генераторов электростанций, так и в высоковольтных сетях, питающихся от этих генераторов. Изучение низкочастотных помех проводилось преимущественно в распределительных сетях Запорожской и Днепропетровской областей, которые питаются от подстанций системы Днепроэнерго. В связи с этим спектр гармоничных составляющих напряжения генератора исследовался на одном из генераторов Днепровской гидроэлектростанции им. В. И. Ленина [36].

Измерительная аппаратура подключалась к шинам генератора посредством высокочастотных устройств присоединения по схеме, показанной на рис. 39. Обмотки генератора соединены звездой. Повышающие однофазные трансформаторы с уровнем напряжения 13,8/154 *кв* составляют трехфазную группу, низковольтные обмотки которой соединены треугольником, а высоковольтные — звездой.

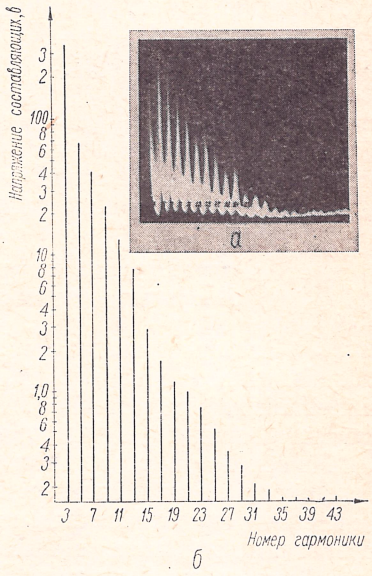


Рис. 40. Спектр гармонических составляющих напряжения изолированного генератора при режиме х. х. для схемы «фаза — земля».

Чтобы измерить спектр гармонических составляющих напряжения генератора в неискаженном виде, последний отключался от трансформаторной группы и работал в режиме холостого хода (х.х.). В этом случае исключалось искажающее действие трансформаторной группы на форму кривой напряжения генератора, а с другой стороны, устранялось влияние внешних гармонических, вносимых на шины генератора общей системой.

Результаты измерения величины напряжения гармоник на шинах генератора при схеме измерения «фаза — земля»

и «фаза — фаза» приведены в табл. 3 (режим х.х.). На рис. 40 представлена спектрограмма (*а*) и график (*б*) амплитудного спектра гармонических составляющих напряжения изолированного генератора при режиме холостого хода для схемы измерения «фаза — земля». Здесь иллюстрируется общеизвестный факт монотонного спада напряжения нечетных гармонических составляющих по мере роста их частоты, что соответствует теории разложения периодической функции в ряд Фурье. Вышеуказанная закономерность монотонного спада напряжения гармонических составляющих используется для сравнения. Относительно нее рассматривается амплитудная структура составляющих напряжения при подключении к генератору силового трансформатора, а также сравнивается амплитудная структура составляющих в линии высокого напряжения.

11. ОБРАЗОВАНИЕ КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ПРОСТЕЙШЕМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

Электромагнитная система трансформатора, содержащая стальной сердечник, обладает нелинейной вольт-амперной характеристикой. В связи с этим силовой трансформатор можно рассматривать как нелинейный элемент.

На основании теории колебаний в электрических цепях, содержащих нелинейный элемент [4, 14, 32, 39 и др.], установлено, что наличие нелинейной вольт-амперной характеристики элемента вызывает органическое изменение исходного спектра составляющих, характеризуемое появлением новых составляющих, не представленных в спектре приложенного напряжения. Для определения возникающего спектра составляющих тока, протекающего через нелинейный элемент, основная трудность обычно состоит в нахождении аналитического выражения, аппроксимирующего вольт-амперную характеристику данного элемента.

Покажем, какое действие оказывает нелинейность вольт-амперной характеристики силового трансформатора на спектр гармонических составляющих напряжения промышленной частоты и проанализируем структуру возникающего при этом спектра. Известно, что аналитическое выражение вольт-амперной характеристики трансформатора чрезвычайно сложно. Трудность состоит в аппроксимировании основной кривой намагничивания стали [2, 6, 25]. Действительные процессы в магнитной цепи трансфор-

Таблица 3

Напряжение *в*, гармонических и комбинационных составляющих на шинах генератора № 4 (ДнепроГЭС)

Группа комбинационных составляющих	Номер гармонической составляющей	Схема измерения			
		Фаза — земля		Фаза — фаза	
		Режим работы генератора			
		Х. х.	Нагрузка 65 *Мва*	Х. х.	Нагрузка 65 *Мва*
	3	335,0	387,0	205,0	146,0
	5	68,3	87,1	102,3	106,5
	7	41,6	56,7	44,2	56,5
	9	21,7	42,9	10,4	14,0
0	11	13,0	75,0	12,1	81,7
	13	7,40	59,7	11,6	55,0
	15	2,80	14,6	2,89	
I	17	1,60	11,5	1,48	10,9
	19	1,30	9,30	0,715	9,20
	21	1,02	8,07	0,719	
II	23	0,75	37,9	0,700	44,0
	25	0,51	31,8	0,490	30,0
	27	0,35			
III	29	0,27	18,5	0,32	15,5
	31	0,22	7,68	0,30	6,9
	33	0,18			
IV	35	0,13	18,2	0,21	20,5
	37	0,102	22,0	0,18	20,4
	39	0,05			
V	41	6,28	7,33	4,26	7,96
	43	5,60	7,20	4,12	6,80
VI	47	15,1	19,1	14,8	18,1
	49	14,2	17,4	13,9	16,5
VII	53	2,13	3,10	2,19	2,63
	55	2,00	3,0	2,01	2,57
VIII	59	3,78	4,50	3,82	5,75
	61	3,62	4,40	3,50	5,55
IX	65	1,56	1,90	1,70	2,12
	67	1,47	1,85	1,50	2,06
X	71	3,62	4,40	3,50	5,75
	73	3,48	4,90	3,62	5,87
XI	77	1,28	1,30	1,11	1,74
	79	1,28	1,50	1,13	1,69

Продолжение табл. 3

Группа комбинационных составляющих	Номер гармонической составляющей	Схема измерения			
		Фаза — земля		Фаза — фаза	
		Режим работы генератора			
		Х. х.	Нагрузка 65 *Мва*	Х. х.	Нагрузка 65 *Мва*
XII	83	1,03	1,01	1,00	1,03
	85	0,95	1,00	0,98	0,95
XIII	89	0,70	0,30	0,52	0,70
	91	0,80	0,36	0,68	0,40

матора определяются петлей гистерезиса, аппроксимирование которой значительно сложнее.

При увеличении насыщения стали до принятых в практических установках величин (12 000—15 000 *гс*) обе ветви кривой намагничивания трансформаторной стали настолько сближаются, что вполне могут быть заменены начальной кривой намагничивания [7]. Для проведения качественного (но не количественного) анализа структуры возникающего спектра составляющих считаем возможным принять наиболее удобную форму аппроксимирующего выражения в виде степенного ряда. Рассмотрим простейший трансформатор как четырехполюсник, имеющий нелинейную зависимость между намагничивающим током i_0 и магнитным потоком Φ. Такая зависимость известна в форме экспериментальной кривой намагничивания $B = f(H)$, которая аппроксимируется степенным рядом, состоящим из членов с нечетными степенями, т. е.

$$B(H) = bH + dH^3 + fH^5 + \cdots,$$

где b, d, f ... — коэффициенты, определяющие зависимость B от H [7, 25].

Вольт-амперная характеристика простейшего трансформатора без потерь может быть представлена аналогичным степенным полиномом

$$i_0 = a_1U + a_2U^3 + a_3U^5 + \cdots,$$

где a_1, a_2, a_3... — коэффициенты, выражающие нелинейную зависимость между намагничивающим током и подводимым напряжением.

Если трансформатор питается напряжением, содержащим, например, три гармонические с частотами ω_1, ω_2, ω_3,

то, ограничившись двумя членами полинома, получаем

$$i_0 = a_1 (U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t + U_3 \sin \omega_3 t) + \\ + a_2 (U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t + U_3 \sin \omega_3 t)^3.$$

Развернув кубический член и собрав составляющие с одинаковыми частотами, находим

$$i_0 = \left(a_1 U_1 + \frac{3}{4} a_2 U_1^3 + \frac{3}{2} a_2 U_1 U_2^2 + \frac{3}{2} a_2 U_1 U_3^2\right) \sin \omega_1 t + \\ + \left(a_1 U_2 + \frac{3}{4} a_2 U_2^3 + \frac{3}{2} a_2 U_1^2 U_2 + \frac{3}{2} a_2 U_2 U_3^2\right) \sin \omega_2 t + \\ + \left(a_1 U_3 + \frac{3}{4} a_2 U_3^3 + \frac{3}{2} a_2 U_1^2 U_3 + \frac{3}{2} a_2 U_3 U_2^2\right) \sin \omega_3 t - \\ - \frac{1}{4} a_2 \left(U_1^3 \sin 3\omega_1 t + U_2^3 \sin 3\omega_2 t + U_3^3 \sin 3\omega_3 t\right) - \\ - \frac{3}{4} a_2 U_1 U_2 [U_1 \sin (2\omega_1 \pm \omega_2) t + U_2 \sin (2\omega_2 \pm \omega_1) t] - \\ - \frac{3}{4} a_2 U_1 U_3 [U_1 \sin (2\omega_1 \pm \omega_3) t + U_3 \sin (2\omega_3 \pm \omega_1) t] - \\ - \frac{3}{4} a_2 U_2 U_3 [U_2 \sin (2\omega_2 \pm \omega_3) t + U_3 \sin (2\omega_3 \pm \omega_2) t] + \\ + \frac{3}{2} a_2 U_1 U_2 U_3 [\sin (\omega_1 + \omega_2 - \omega_3) t + \sin (\omega_2 + \omega_3 - \omega_1) t + \\ + \sin (\omega_3 + \omega_1 - \omega_2) t - \sin (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3) t]. \qquad (53)$$

Выражение (53) показывает, что в намагничивающем токе трансформатора, кроме составляющих с частотами ω_1, ω_2, ω_3, содержатся составляющие с утроенными частотами $3\omega_1, 3\omega_2, 3\omega_3$, а также колебания комбинационных частот вида $(2\omega_1 \pm \omega_2)$; $(2\omega_2 \pm \omega_1)$; $(2\omega_1 \pm \omega_3)$; $(2\omega_3 \pm \omega_1)$; $(2\omega_2 \pm \pm \omega_3)$; $(2\omega_3 \pm \omega_2)$; $(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3)$; $(\omega_2 + \omega_3 - \omega_1)$; $(\omega_3 + \omega_1 - - \omega_2)$; $(\omega_1 + \omega_2 - \omega_3)$.

В действительности, кривая напряжения промышленной частоты содержит не три, а значительно большее число гармоник, поэтому в намагничивающем токе трансформатора образуется более сложный спектр частот. Составными элементами этого спектра, как показывает выражение (53), являются следующие компоненты:

а) колебания основных частот, складывающиеся из бесконечного количества членов,

$$i_{0_n} = a_1 U_n + \frac{3}{4} a_2 U_n^3 + \frac{3}{2} a_2 U_n \sum_{k=n}^{\infty} U_k^2;$$

б) утроенные гармоники

$$i_{03n} = \frac{1}{4} a_2 U_n^3;$$

комбинационные составляющие

$$i_{0k} = \frac{3}{4} a_2 U_n^2 U_i; \quad i_{0m} = \frac{3}{2} a_2 U_n U_i U_j,$$

где n, i, j,... — нечетные гармоники; $k = (2n + 1)$; $m = (n \pm i \pm j)$.

Следовательно, при питании трансформатора напряжением, содержащим нечетные гармонические колебания, в намагничивающем токе трансформатора происходит взаимодействие колебаний различных частот. Механизм взаимодействия колебаний в нелинейном элементе еще не объяснен, хотя само явление широко используется в радиотехнических устройствах.

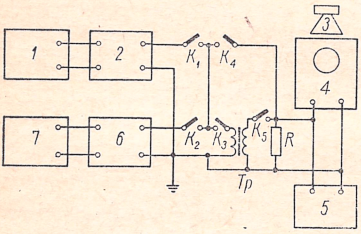


Рис. 41. Схема для наблюдения гармонических составляющих и колебаний комбинационных частот:
1 и *7* — генератор звуковых частот типа ЗГ-10; *2* — узкополосный фильтр с частотой 150 *гц*; *3* — фотоприставка; *4* — анализатор спектра типа АСЧХ-1; *5* — вольтметр типа МВЛ-2М; *6* — узкополосный фильтр с частотой 300 *гц*; *R* — активное сопротивление 600 *ом*.

Возникающие в намагничивающем токе трансформатора колебания комбинационных частот создают э. д. с. как в первичной, так и во вторичной обмотке, соответствующие нечетным гармоникам питающего напряжения. При этом амплитудная структура комбинационных составляющих отличается от закономерности монотонного спада амплитуд гармонических составляющих напряжения генератора. В этом состоит первая отличительная особенность комбинационных составляющих от гармонических, которая иллюстрируется приводимым ниже экспериментом. Вторая характерная особенность комбинационных составляющих, возникающих в трансформаторе, состоит в органическом отличии их от частот исходного напряжения, что также подтверждается экспериментально.

Схема для наблюдения гармонических составляющих и колебаний комбинационных частот приведена на рис. 41. Источниками исходных колебаний являются два генератора звуковой частоты, имеющие выходное сопротивление рав-

ное 600 *ом**. Для подавления в каждом исходном колебании высших гармоник напряжения применяется фильтр, характеристическое сопротивление которого также равно 600 *ом*. В качестве согласованной нагрузки для генераторов, фильтров и трансформатора используется активное сопротивление $R = 600$ *ом*.

Необходимо отметить, что характеристическое сопротивление каждого фильтра, будучи активным в полосе его пропускания и последовательно включенным в цепь тока питания трансформатора, дает возможность наблюдать составляющие напряжения во вторичной обмотке трансформатора.

Для исследования спектрального состава напряжения, снимаемого с нагрузочного сопротивления R, применяется анализатор спектра типа АСЧХ-1. С экрана электронно-лучевой трубки анализатора фотографировалась спектрограмма, спектральные линии которой соответствуют строго определенным частотам, а их высота пропорциональна амплитуде напряжения составляющих. Для точного определения частоты и амплитуды составляющих исследуемого напряжения снималась калибровочная спектрограмма, путем подачи на вход анализатора напряжения известной частоты, замеряемого ламповым вольтметром (см. параграф 12).

Для иллюстрации образования колебаний комбинационных частот в простейшем трансформаторе были выбраны две исходные частоты $f_1 = 150$ *гц* и $f_2 = 300$ *гц*. Наиболее выгодное расположение частот соответствует соотношению $2f_1 = f_2$. Такое соотношение выбрано с учетом наилучшего использования разрешающей способности анализатора, чтобы частотный интервал между спектральными линиями был возможно большим.

Спектральный состав отфильтрованного исходного напряжения можно наблюдать с помощью анализатора спектра. В этом случае трансформатор отключается. Показателем хорошей фильтрации исходного колебания является отсутствие на экране анализатора высших гармонических напряжений.

При включенном трансформаторе в спектре первого колебания ($f_1 = 150$ *гц*) появляется напряжение нечетных гармонических с частотами 450, 750, 1050 *гц* и т. д., а в спектре второго колебания ($f_2 = 300$ *гц*) — напряжение со-

---

* В технике связи 600-омное сопротивление принято стандартным для проводных устройств, фильтров и прочих четырехполюсников, а также для измерительной аппаратуры.

ставляющих с частотами 900, 1500 *гц* и т. д. Амплитудные значения напряжения гармонических составляющих на выходе трансформатора от каждого исходного колебания, подаваемого в отдельности, показаны на рис. 42. Составляющие первого исходного колебания изображены в виде сплошных спектральных линий, а второго — пунктирными линиями. Тонкими кривыми *1* и *2* на рис. 42 и 43 изображены огибающие амплитудных значений напряжения гармоник указанных колебаний.

Заметим, что при подаче на вход трансформатора одного лишь исходного колебания на входе трансформатора отсутствуют составляющие с частотами 600, 1200, 1800 *гц* и

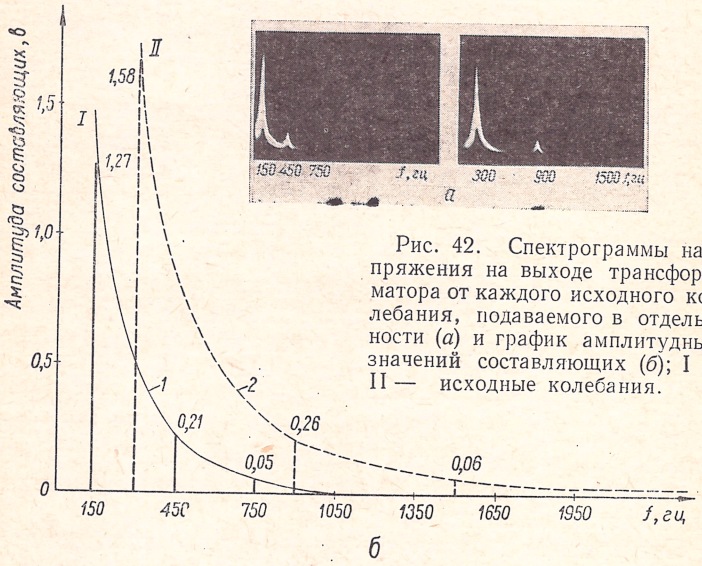


Рис. 42. Спектрограммы напряжения на выходе трансформатора от каждого исходного колебания, подаваемого в отдельности (*а*) и график амплитудных значений составляющих (*б*); I и II — исходные колебания.

т. д. Когда же на вход трансформатора подведены одновременно два колебания, то в спектре напряжения на выходе трансформатора содержатся комбинационные частоты вида

$$2f_1 \pm mf_2; \quad 2f_2 \pm mf_1 \qquad (m = 1, 2, 3 \ldots n),$$

среди которых появились новые составляющие: 600, 1200, 1800 *гц* и т. д. На рис. 43 они отмечены значком Δ. Относительно кривых *1* и *2* на рис. 43 можно наблюдать соотношение амплитуд гармоник и комбинационных составляющих. В частности, при взаимодействии обеих исходных колебаний в нелинейной магнитной системе трансформатора амплитуда составляющей с частотой 150 *гц* уменьшилась с 1,27 до

1,11 *в*; амплитуда составляющей с частотой 450 *гц*, наоборот, увеличилась с 0,21 до 0,29 *в* и у составляющей с частотой 750 *гц* возросла с 0,05 до 0,3 *в* и т. д.

Заметим, что если гармонические составляющие на выходе трансформатора от каждого исходного колебания в отдельности (рис. 42) имели экспоненциальный закон

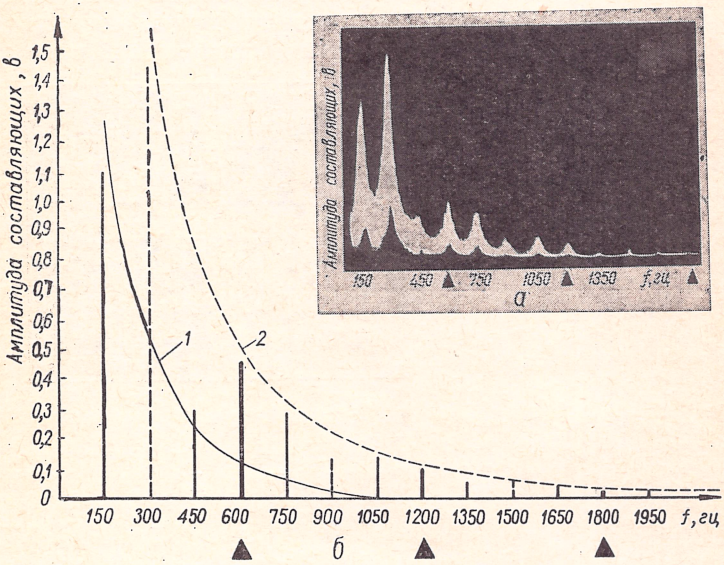


Рис. 43. Комбинационные составляющие на выходе трансформатора от взаимодействия гармонических составляющих двух исходных колебаний, подаваемых одновременно:
а — спектрограмма; *б* — спектр составляющих.

спадания амплитуды по мере роста их порядка, то комбинационные составляющие (рис. 43) не подчиняются закономерности плавного спадания амплитуд. Так, составляющая с частотой 600 *гц* (рис. 43) преобладает над составляющей 450 *гц* так же, как составляющие 1050 и 1500 *гц* — соответственно над составляющими с частотой 900 и 1350 *гц*.

Описанный выше опыт трансформации двух исходных частот в простейшем трансформаторе достаточно убедительно иллюстрирует образование комбинационных частот, которые существенно видоизменяют амплитудную структуру исходного напряжения.

12. СПЕКТР КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ, ОБРАЗУЮЩИЙСЯ В ТРЕХФАЗНОМ ТРАНСФОРМАТОРЕ

В трехфазном трансформаторе спектр частотного преобразования несколько иной, чем в однофазном. Это обусловлено тем, что в трехфазном трансформаторе с симметричным магнитопроводом при соответствующем соединении обмоток и при симметричной системе напряжений в намаг-

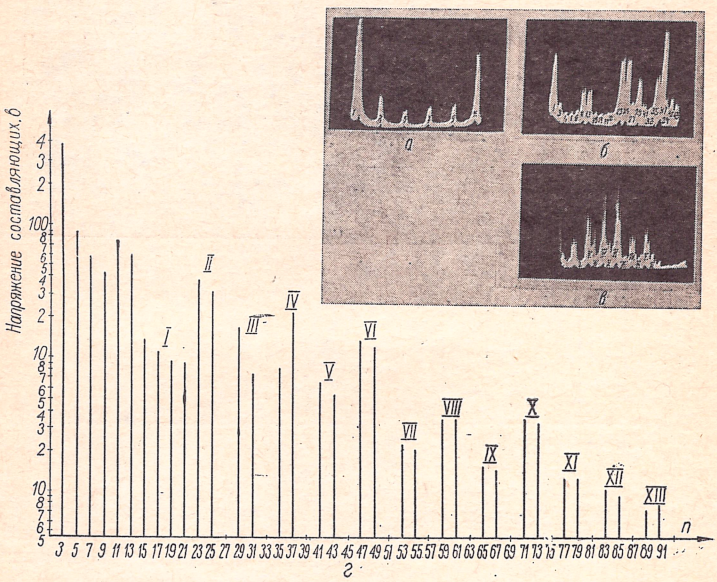


Рис. 44. Спектр комбинационных составляющих напряжения на шинах генератора при нагрузке 65 *Мва* и гармонических составляющих (пунктирная кривая) для схемы измерения «фаза—земля».

ничивающем токе подавляются гармонические составляющие, кратные трем. За счет их исчезновения из спектра в последнем появляются частотные интервалы, равные 200 *гц*. Поэтому частотная структура оставшихся составляющих имеет следующую последовательность гармоник: 1, 5, 7, 11, 13, 17 и т. д., которая описывается выражением

$$n = 3(k-1) + 2^{1+(-1)^{k+1}}(-1)^k + 3(-1)^{k-1},$$

где k — любое целое число, начиная с двух.

Характерный для трехфазных трансформаторов спектр

комбинационных составляющих показан на графике (рис. 44). Здесь спектральными линиями изображены частота и напряжение составляющих на шинах генератора, полученные на основании спектрограмм, снятых посредством описанной ранее измерительной схемы (рис. 39). При этом генератор подключался к высоковольтной сети через трансформаторную группу и ставился под нагрузку 65 *Мва*. Нагрузка трансформатора, близкая к номинальной, как известно, влияет на форму кривой напряжения.

Спектрограммы, приведенные на рис. 44, сделаны в трех частотных диапазонах: 20—500 (*а*), 100—2000 (*б*) и 400—5000 (*в*) *гц*. Спектр комбинационных составляющих, полученный на основании этих измерений, изображен на рис. 44, *г*. Комбинационные составляющие, соответствующие *17* и *19*-й гармоникам, образуют группу *I*, 23-я и 25-я — группу *II* и т. д.

Результаты измерений, сведенные в табл. 3, показывают, что при обеих схемах измерения составляющие имеют одинаковый порядок значений, однако при схеме «фаза — фаза» составляющие, кратные трем, меньше, а *5* и 7-я несколько превосходят их величину при схеме «фаза — земля».

Сравнивая амплитудную и частотную структуры составляющих при режимах х.х. и нагрузки генератора, показанных соответственно на графиках (рис. 40, *б* и 44, *г*), можно утверждать следующее:

1. При работе трансформатора *3*, *5* и *7*-я составляющие увеличены незначительно по сравнению с их значениями на шинах изолированного генератора, работающего в режиме х.х.

2. Комбинационные составляющие, возникшие в трансформаторе на основе исходных гармоник напряжения, имеют значения в десятки, сотни и тысячи раз больше по сравнению с величиной соответствующих гармонических составляющих напряжения изолированного генератора.

3. Вследствие подавления в намагничивающем токе трансформатора частот, кратных трем, комбинационные составляющие оказываются сгруппированными по две. Частотный интервал между ними равен 100 *гц*, а между группами — 200 *гц*.

4. Если гармонические составляющие обладают монотонным законом убывания амплитуд (рис. 40), то для комбинационных составляющих характерно преобладание амплитуды колебания более высокой частоты над амплитудой

колебания смежной меньшей частоты. Так, на рис. 44 напряжение *11* и *13*-й составляющих больше *7*, *9*-й и соизмеримо с напряжением *5*-й — так же, как напряжение составляющих *II* группы преобладает над составляющими *I* группы и т. д.

Необычная амплитудная структура рассматриваемого спектра, не соответствующая общеизвестному соотношению амплитуд гармоник при разложении кривой в ряд Фурье, указывает на совершенно иную природу его происхождения.

Приведенные выше материалы о взаимодействии гармоник напряжения в нелинейной магнитной системе трансформатора показывают лишь качественную сторону образующегося спектра комбинационных составляющих. Эти данные следует рассматривать с точки зрения доказательства существования самого явления. Раскрытие же закономерностей количественного соотношения амплитуд исходных гармоник и комбинационных частот является более сложным и требует специального исследования.

13. КОМБИНАЦИОННЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Методика и техника измерения

Для экспериментального изучения электрических колебаний в сетях 0,4—35 *кв* применялась блок-схема приборов, показанная на рис. 14.

Низкочастотные составляющие в диапазоне от 20 до 20 000 *гц* исследовались с помощью анализатора спектра типа АСЧХ-1. Раскладывая сложный сигнал методом последовательного анализа на отдельные составляющие, при помощи анализатора на экране электронно-лучевой трубки (с помощью фотоприставки *5*) фотографировались спектральные линии, соответствующие определенным частотам. Высота каждой спектральной линии пропорциональна напряжению составляющей на 600-омном входном сопротивлении. На рис. 45, *б*, *в*, *г*, *д* показаны типичные спектрограммы составляющих напряжения помех в каждом из четырех поддиапазонов анализатора: 20—500, 60—2000, 100—5000 и 400—20 000 *гц*. Динамическая разрешающая способность анализатора (способность четко выделять спектральные линии 2-х соседних гармоник) в указанных поддиапазонах составляет 12, 60, 100 и 400 *гц*. На рис. 45, *е*, *ж*, *з*, *и* приведены

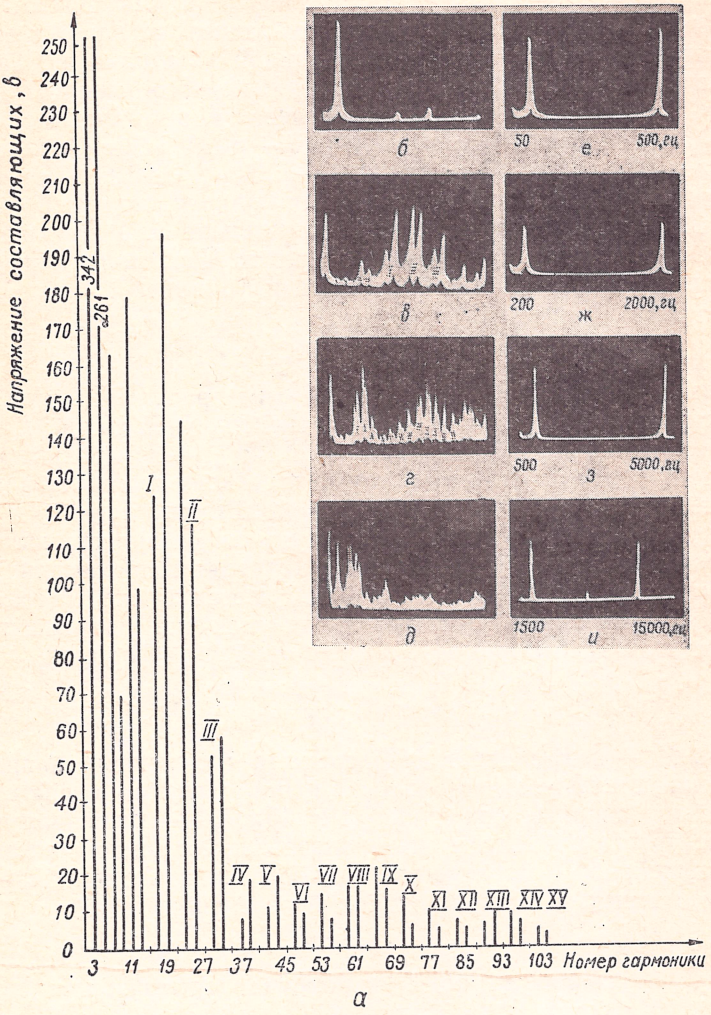


Рис. 45. Спектр комбинационных составляющих в сети 35 *кв* при схеме измерения «фаза — земля» (*а*), построенный по спектрограммам помех (*б*, *в*, *г*, *д*), калибровочным спектрограммам (*е*, *ж*, *з*, *и*) и частотной характеристике устройства присоединения; I—XV — номер группы.

калибровочные спектрограммы, необходимые для точного определения частоты и напряжения составляющих. Они выполнялись путем подачи на вход анализатора напряжения определенной частоты, калиброванной по амплитуде. Так, на калибровочной спектрограмме для первого поддиапазона (рис. 45, *е*) спектральная линия слева соответствует частоте 50 *гц*, а справа — 500 *гц*, во втором — 200 и 2000 *гц*, в третьем—500 и 5000 *гц* и в четвертом—1500 и 15 000 *гц*. Погрешность оценки амплитуд составляющих относительно калибровочного напряжения не превышала 10% при минимально необходимом времени анализа. Частота (f) каждой спектральной линии определялась по формуле

$$f = l_f \frac{f_к}{l_к},$$

где l_f — измеренное по спектрограмме расстояние от начала хода луча слева до данной спектральной линии; $f_к$ — частота калибровочного напряжения; $l_к$ — измеренное по спектрограмме расстояние от начала хода луча слева до спектральной линии калибровочной частоты.

Вследствие неодинакового затухания различных частот в устройстве присоединения (рис. 15) соотношение амплитуд низкочастотных составляющих получается на спектрограммах искаженным. Действительная величина напряжения составляющей в линии (U_f) определяется по формуле

$$U_f = K_f h_f \frac{U_к}{h_к},$$

где K_f — коэффициент для пересчета измеренного напряжения составляющей на входном сопротивлении в действительное напряжение в линии (рис. 15); h_f — измеренная по спектрограмме высота спектральной линии данной составляющей; $U_к$ — напряжение калибровочной частоты; $h_к$ — высота спектральной линии калибровочной частоты.

Амплитуда комбинационных составляющих в сетях 0,4—35 *кв*

Измерением низкочастотных помех в различных сетях 35, 10, 6, 0,4 *кв* обнаружена однотипная структура спектра комбинационных составляющих, независимо от уровня напряжения линии. Частотная структура комбина-

ционных составляющих в сетях различного класса напряжения идентична (рис. 45—48). На графиках указанных рисунков вертикальными линиями изображены соответствующие спектрограммам действительные величины напряжения комбинационных составляющих в линии.

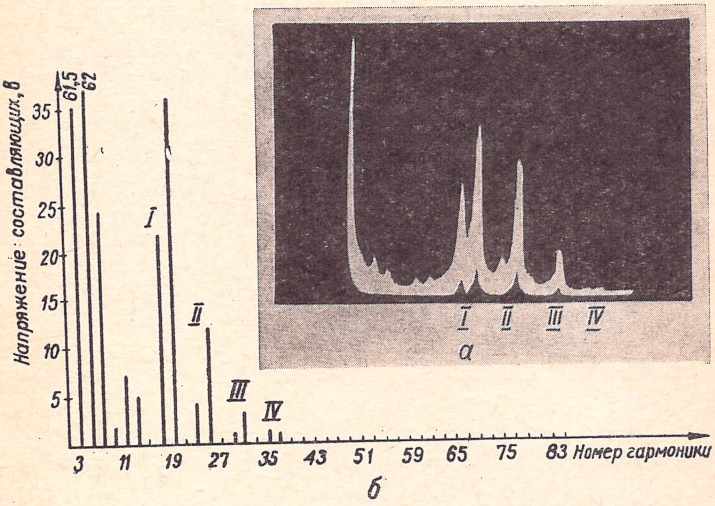


Рис. 46. Спектрограмма комбинационных составляющих при однократном трансформировании напряжения (*а*) и график значений напряжения составляющих (*б*) (сеть 10 *кв*; схема измерения «фаза—фаза»).

Комбинационные составляющие в высоковольтных линиях совпадают с нечетными гармониками 50-периодного напряжения, среди которых подавлены кратные трем. Вследствие этого остальные составляющие расположены группами с частотным интервалом 200 *гц*.

При пересчете измеренных на спектрограммах величин напряжения составляющих в их действительные значения в линии обнаружено, что монотонный спад амплитуд составляющих по мере увеличения их порядка отсутствует, за исключением *3* и *5*-й, амплитуда которых всегда остается преобладающей. Составляющие, соответствующие *11*, *13*, *17*, *19*, *23*, *25* гармоникам, а иногда и другие, соизмеримы с амплитудой *7*-й гармонической или преобладают над ней. Амплитуда некоторых колебаний более высоких частот, как правило, преобладает над амплитудой колебаний меньшей частоты. Для них характерно исчезновение или резкое

уменьшение напряжения составляющих высокого порядка одновременно со спадом напряжения первых гармоник.

Обнаружено, что при многократном трансформировании напряжения (рис. 47 и 48) в спектре содержатся составляю-

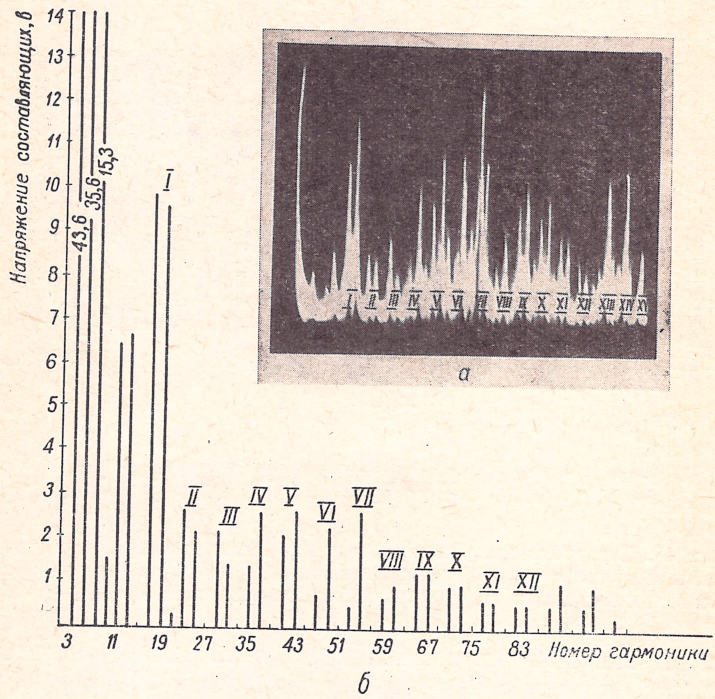


Рис. 47. Спектрограмма комбинационных составляющих при трехкратном трансформировании напряжения (*а*) и график значений напряжения составляющих (*б*) (сеть 6 *кв*; схема измерения «фаза — фаза»).

щие более высокого порядка по сравнению со спектром при однократном трансформировании (рис. 46). Данные, приведенные на рис. 46—48, иллюстрируют относительное увеличение амплитуд напряжения комбинационных составляющих более высокого порядка каждой ступенью трансформирования.

Величина напряжения составляющих более высокого порядка при обеих схемах измерения имеет одинаковый порядок значений, однако при схеме измерения «фаза — фаза» напряжение 5-ой и 7-ой гармонических несколько выше,

чем при схеме «фаза — земля». В сетях 6, 10 *кв* напряжение составляющих менее стабильно, чем в сетях 35 *кв*. Еще более неустойчивы амплитуды составляющих и их соотношения в сетях 0,4 *кв*.

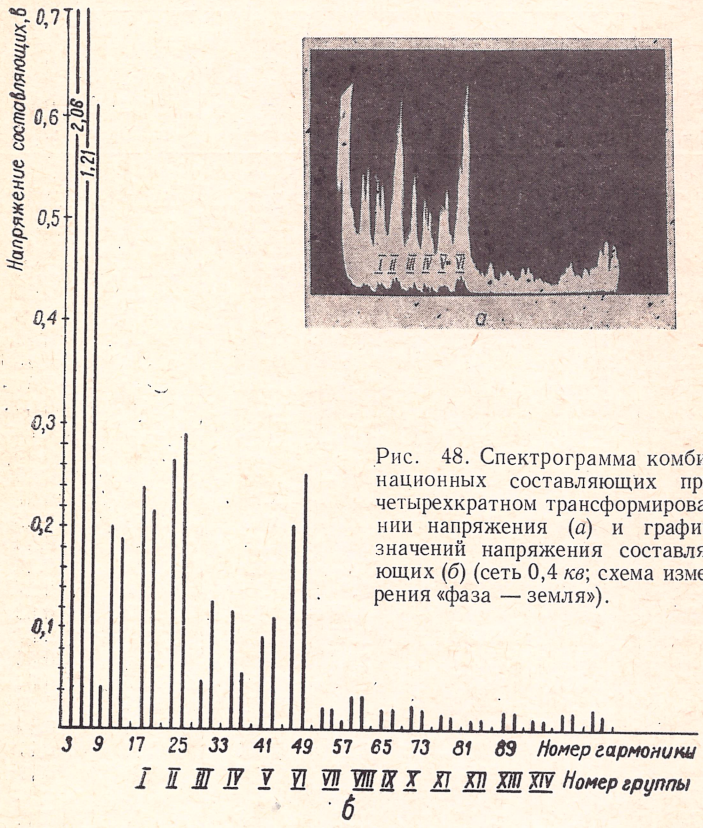


Рис. 48. Спектрограмма комбинационных составляющих при четырехкратном трансформировании напряжения (*а*) и график значений напряжения составляющих (*б*) (сеть 0,4 *кв*; схема измерения «фаза — земля»).

Описанным методом проведено 79 серий измерений низкочастотных колебаний в сетях Запорожской и Днепропетровской областей, а также Ставропольского края [29, 30, 35, 37]. Из указанного количества 23 серии измерений сделано в сетях 35 *кв*, 38 серий — в сетях 6 и 10 *кв* и 18 серий — в сетях 0,4 *кв*. На основании массовых замеров определены средние величины напряжения комбинационных составляющих, которые приведены в табл. 4. Эти данные представляют

Таблица 4

Напряжение комбинационных составляющих в сетях 35, 6—10 и 0,4 *кв*

Номер гармонической составляющей	Сети 35 *кв*		Сети 6—10 *кв*		Сети 0,4 *кв*	
	Напряжение составляющей, *в*	В процентах к фазному напряжению	Напряжение составляющей, *в*	В процентах к фазному напряжению	Напряжение составляющей, *в*	В процентах к фазному напряжению
3	342	1,69	128,0	3,70	27,10	12,30
5	261	1,24	71,0	2,05	9,76	3,98
7	174	0,36	41,8	1,21	8,36	3,80
9	71	0,35	10,5	0,30	1,22	0,55
11	299	1,48	31,0	0,89	8,50	3,86
13	220	1,09	27,9	0,80	5,92	2,70
17	125	0,62	23,6	0,68	1,50	0,68
19	196	0,97	27,0	0,78	1,20	0,45
23	146	0,72	37,0	1,07	2,25	1,02
25	117	0,58	37,7	1,09	1,33	0,60
29	53,6	0,265	35,7	1,03	1,17	0,53
31	59,0	0,292	32,4	0,94	0,78	0,35
35	24,1	0,119	17,4	0,50	0,64	0,29
37	24,7	0,122	13,4	0,39	0,59	0,27
41	16,5	0,082	8,3	0,24	0,56	0,25
43	20,8	0,103	7,8	0,22	0,50	0,28
47	12,5	0,065	10,6	0,30	0,63	0,28
49	14,2	0,070	6,9	0,20	0,60	0,27
53	15,4	0,078	4,95	0,14	1,27	0,58
55	10,5	0,052	2,55	0,070	1,25	0,57
59	19,1	0,094	2,97	0,086	1,23	0,56
61	17,6	0,087	2,93	0,085	1,17	0,53
65	21,5	0,106	2,00	0,058	0,65	0,29
67	15,5	0,077	1,53	0,044	0,64	0,29
71	14,4	0,071	1,82	0,053	0,24	0,11
73	13,4	0,066	1,35	0,039	0,24	0,11
77	10,0	0,049	0,85	0,024	0,73	0,33
79	8,35	0,041	1,26	0,036	0,71	0,32
83	7,15	0,035	1,38	0,040	0,29	0,13
85	4,68	0,023	1,33	0,038	0,29	0,13
89	6,55	0,032	1,00	0,029	0,24	0,11
91	9,75	0,048	1,10	0,032	0,38	0,17
95	9,20	0,045	1,13	0,032	0,40	0,18
97	6,35	0,033	1,00	0,029	0,21	0,099
101	4,62	0,023	0,60	0,017	0,02	0,092
103	2,70	0,130	0,58	0,016	0,02	0,091

один из основных параметров для расчета каналов телемеханики, а обнаруженная закономерность частотной структуры

составляющих дает возможность более обоснованно конструировать аппаратуру телемеханики в тональном диапазоне частот.

При анализе результатов измерений установлено, что низкочастотные составляющие с указанной структурой спектра являются преобладающими помехами на частотах до 10 *кгц* в сетях 35 *кв*, до 5 *кгц* — в сетях 10 *кв*, до 4 *кгц* — в сетях 6 *кв*, до 3 *кгц* — в сетях 0,4 *кв*. Выше указанных частот напряжение комбинационных составляющих становится соизмеримым с импульсными помехами от частичных разрядов на изоляторах линии [27, 28, 37].

14. ОСОБЕННОСТИ ПОМЕХ ОТ ТРАНСФОРМАТОРОВ И МЕТОДЫ ИХ УЧЕТА

Выше было показано, что в нелинейной магнитной системе трансформатора имеет место взаимодействие гармонических составляющих напряжения генератора, в результате чего в обеих обмотках трансформатора появляются комбинационные составляющие. В линиях электропередачи низкочастотные колебания являются не гармониками напряжения генераторов электростанций, а комбинационными составляющими. Они представляют собой немодулированные колебания, кратные нечетным гармоникам напряжения промышленной частоты 50 *гц*, обладают дискретной структурой спектра и располагаются группами по две составляющие с частотным интервалом 100 *гц* между ними и 200 *гц* между группами.

Характерная особенность комбинационных составляющих заключается в том, что амплитуда напряжения некоторых колебаний более высоких частот превосходит амплитуду колебаний с меньшей частотой, при этом тенденция их спада с ростом частоты сохраняется.

Комбинационные составляющие являются преобладающими помехами на частотах до 10 *кгц* в сетях 35 *кв*, до 5 *кгц* — в сетях 10 *кв*, до 4 *кгц* — в сетях 6 *кв* и до 3 *кгц* — в сетях 0,4 *кв*.

Обнаруженные закономерности спектральной структуры комбинационных составляющих во многих случаях позволяют повысить помехоустойчивость каналов телемеханики. Помехи этого вида должны учитываться при разработке аппаратуры и настройке каналов.

При конструировании телемеханической аппаратуры, предназначенной для работы по электрическим линиям в тональном диапазоне частот, рабочие частоты каналов необходимо располагать в интервалах 200 *гц* между группами комбинационных составляющих.

IV. ПОМЕХИ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ В ЛИНИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

15. ОСОБЕННОСТИ ПОМЕХ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Наряду с помехами от изоляторов, генераторов и трансформаторов в линиях высокого напряжения имеются помехи в виде модулированных колебаний с программами радиовещания, телеграфа и низкочастотного тона в виде свиста.

Во многих работах, касающихся высокочастотной связи по проводам линий электропередач, указывается на недопустимость совпадения рабочих частот канала связи с частотами местных радиопередатчиков. При совпадении частот работа высокочастотного канала, как известно, становится невозможной. В процессе проектирования высокочастотной связи этот фактор всегда учитывается путем сдвига рабочих частот канала относительно частоты радиопередатчика.

В Федеративной Республике Германии при проектировании высокочастотных каналов по проводам линий электропередачи приходится считаться с вероятностями помех от радиостанций [78] следующих уровней: —3,9 *неп* в 50% случаев; —2,65 *неп* в 10 % случаев. Эти помехи доставляют много трудностей технике высокочастотной связи в европейских странах с высокой плотностью радиопередающих станций, где их мешающее действие на каналы высокочастотной связи сказывается наиболее сильно.

Изучение помех от передатчиков в распределительных электрических линиях оказалось более успешным по сравнению с исследованиями в линиях высших напряжений. Это обусловлено тем обстоятельством, что в распределительных сетях 0,4—35 *кв* помехи от радиопередатчиков проявляют себя соизмеримыми (сети 35 *кв*) и даже преобладающими над помехами от изоляторов (сети 0,4, 6 и 10 *кв*). Благодаря большей доступности их исследования в усло-

виях отсутствия короны и сравнительно малого уровня помех от изоляторов удалось обнаружить целый ряд закономерностей, свойственных мешающим колебаниям от радиопередатчиков.

Обнаружено, что в распределительных сетях 0,4—35 *кв* мешающие модулированные колебания с программами радиовещания имеются не только на рабочих частотах радиопередатчиков, но и на частотах, не занятых ими. Они заполняют строго определенные полосы частот в диапазоне единиц и десятков килогерц*, в то время, как радиопередатчики, вещающие эти программы, работают на частотах более 150 *кгц*. Ширина полос, занятых такими помехами, обычно составляет 1—2 *кгц*, небольшое их количество занимает 4—5 *кгц* и некоторые полосы доходят до 8—10 *кгц*.

Опыт высокочастотной связи по линиям 6, 10 и 35 *кв* показал, что, когда рабочая частота канала попадает в полосу, занятую такими помехами, во многих случаях нормальную работу канала получить не удается. В этом случае в телефонном канале, особенно с большим затуханием, весьма громко слышна программа радиовещания, работа телеграфа или шума. На одних частотах рассматриваемые помехи воспринимаются в виде неискаженной передачи местного радиовещания, на других частотах — наложение двух программ или сочетание сигнала вещания с низкочастотным колебанием (свист), на третьих частотах — искаженный сигнал вещания на фоне гладкого шума и т. д.

Мешающие модулированные колебания, заполняющие в высоковольтных линиях более низкие частоты, чем частоты соответствующих радиопередатчиков, отличаются целым рядом особенностей. Первой особенностью является существенное различие диаграммы напряженности электромагнитного поля на рабочей частоте радиопередатчика и на частоте помехи с программой того же передатчика.

Так, от одной из местных вещательных радиостанций, работающей на частоте около 398 *кгц*, в линии 35 *кв* наводится э.д.с. с уровнем — 4 *неп* (нагрузка 600 *ом*). Напряженность поля, измеренная в перпендикулярной плоскости относительно оси высоковольтной линии, имеет диаграмму уровней, показанную на рис. 49 кривыми *1* и *2*. На оси абсцисс нанесены расстояния (*s*) от линии до измерителя

---

* В линиях высокого напряжения имеются помехи такого происхождения и в диапазоне более высоких частот.

помех, а по оси ординат отложены относительные значения напряженности поля E. Измерения выполнены с помощью измерителя помех типа ИП-12М при штыревой (кривая *1*) и рамочной антеннах (кривая *2*). Кривые показывают, что уровень поля на расстоянии 5—7 *м* от оси линии начинает резко спадать. На расстоянии 30—35 *м* имеется минимум, вызванный сложением поля от тока, наведенного в линии как в антенне, с основным полем излучения радиопередатчика. При дальнейшем удалении от линии поле возрастает до некоторого постоянного уровня напряженности, обусловленного интенсивностью излучения радиопередатчика.

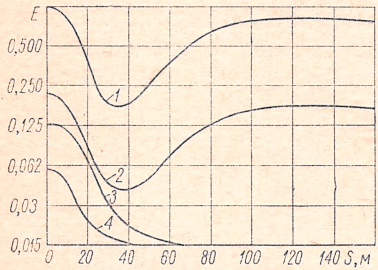


Рис. 49. Кривые уровня поля помех от радиопередатчика под линией 35 *кв*:

1, *2* — на рабочей частоте передатчика (398 *кгц*); *3*, *4* — на преобразованной частоте (49,5 *кгц*) с сигналом того же передатчика.

Такое изменение уровня поля вблизи высоковольтной линии свойственно только лишь для частот, на которых работают радиопередатчики. Аналогичные данные приводились и в других работах [26]. Однако на более низких частотах модулированные колебания с той же программой вещания имеют иное изменение уровня поля. Так, на рис. 49 кривыми 3 и 4 показана конфигурация уровня поля помех, принимаемых на частоте 49,5 *кгц* и содержащих ту же программу вещания, что передает местная радиостанция на частоте около 398 *кгц*. Эти измерения сделаны с помощью избирательного указателя уровня фирмы «Tekade» при штыревой антенне (кривая *3*) и рамочной (кривая *4*). Следовательно, спадающий до исчезновения уровень поля по кривой, напоминающей колокольную форму, характерен для помех, возникших в высоковольтной линии от наведенных радиопередатчиками токов.

Второй отличительной особенностью помех от радиопередатчиков на низких частотах является их исчезновение при установившейся сырой погоде, а также отсутствие на новых линиях, не бывших под напряжением.

16. ПОМЕХИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ БЕЗ НАПРЯЖЕНИЯ

При отключении высокого напряжения в линии исчезают всплески помех, обусловленные частичными разрядами в изоляторах. При этом уровень помех падает до значений от —8 до —9 *неп*.

В табл. 5 приведены результаты измерения помех от радиопередатчиков в линии 35 *кв*. При измерении помех без напряжения получен увеличенный уровень радиосигналов в среднем на 1 *неп*. Это увеличение вызвано за счет непосредственного подключения измерителя помех к проводу линии и отсутствия при этом затухания в устройстве присоединения.

При выключенном напряжении помехи в виде радиосигналов обнаруживаются на частотах 38, 45, 50, 55, 68, 122, 128, 138, 154 *кгц*. Присутствие радиосигналов на частотах 6, 10 и 34—35 *кгц* можно заметить по характерной для сигналов вещания форме кривой напряжения, наблюдаемой на экране осциллографа. Когда же в линии отсутствует напряжение, то, кроме указанных частот, помехи в виде модулированных колебаний принимаются на частотах 7; 9; 14,9; 15,5; 19; 34; 102,5; 107 *кгц*.

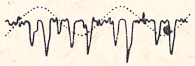
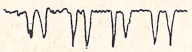
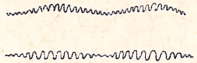
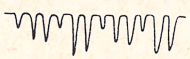
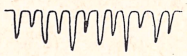
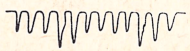
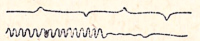
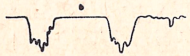
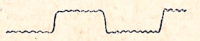
Когда отключено напряжение и маскирующее действие помех от изоляторов отсутствует, на всех частотах явно прослушивается наложение двух сигналов. Характеристика этих сигналов чаще представляет собой наложение двух программ вещания или программы вещания на низкочастотный звук (свист). Наложение двух сигналов свидетельствует о происхождении мешающих модулированных колебаний за счет нелинейных элементов, в которых происходит преобразование исходных частот радиопередатчиков.

Результаты двух приведенных измерений наглядно показывают, что в высоковольтной линии без напряжения основными помехами являются модулированные колебания в виде сигналов радиовещания и телеграфа, имеющие значительный уровень.

Во время измерений при отключенном напряжении обнаружено, что наибольшее количество частот, занятых модулированными колебаниями, имеет место в линиях более высокого класса напряжения. Например, в линиях 154 *кв* Днепровской энергосистемы помехи от радиопередатчиков зафиксированы на 76 частотах (в диапазоне до 150 *кгц*),

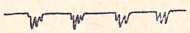
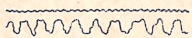
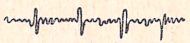
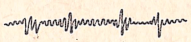
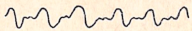
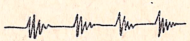
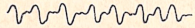
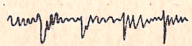
Таблица 5

Помехи от радиопередатчиков в линии 35 *кв*

Частота, *кгц*	Уровень, *нп*, при $\Delta f = 1$ *кгц*	Наличие напряжения: Форма кривой на экране осциллографа	Наличие напряжения: Прослушивание в телефон	Частота, *кгц*	Уровень, *нп*, при $\Delta f = 1$ *кгц*	Отсутствие напряжения: Форма кривой на экране осциллографа	Отсутствие напряжения: Прослушивание в телефон
6	—4,2		Резкий гудящий звук низкого тона, трески, щелчки	7	—5,1		Вещание без искажений на фоне свиста
10	—4,8		То же	9	—3,9		Вещание без искажений на фоне свиста. Верхняя кривая при отсутствии сигнала вещания, нижняя — при наличии вещания
15	—4,5		Резкий гудящий звук низкого тона		—3,8		
18	—3,8		То же	10	—4,9		Наложение низкого гудящего звука на вещание
20	—4,3		» »	14,9	—4,0		Треск
35	<—6		Шум, трески	15,5	—5,2		Работа радиотелеграфа на фоне свиста

37 38	—6 —5,4		Шум, трески, сильно искаженное вещание	19	—4,5	Наложение вещания на радиотелеграф
40	<—6		Шум, трески	34	—4,8	Наложение вещания на свист высокого тона (Киев)
45 50	—6 —6		Шум, трески, вещание с большим искажением	37	—5	Вещание без искажений (Киев)
55	—5,6		Шум, вещание с очень большим искажением	49,8	—3,7	I, II } Наложение I и II программ вещания
56—67	—6		Шум, трески, пульсация уровня			
68	—4,3		Вещание, шум, трески	55	—4,4	Наложение вещания на сигнал радиотелеграфа
69—122	<—6		Трески, шум, пульсация уровня	68	—3,5	Наложение программ двух станций на однотонный свист
122	—6		Трески, шум, очень неразборчивое вещание	102,5	—4,4	Наложение вещания на однотонный свист

Продолжение табл. 5

Частота, *кгц*	Уровень, *нп*, при $\Delta f = 1$ *кгц*	Наличие напряжения: Форма кривой на экране осциллографа	Наличие напряжения: Прослушивание в телефон	Частота, *кгц*	Уровень, *нп*, при $\Delta f = 1$ *кгц*	Отсутствие напряжения: Форма кривой на экране осциллографа	Отсутствие напряжения: Прослушивание в телефон
125	<-6		Трески, шум, пульсация уровня	107	—5,0		Наложение вещания на однотонный свист
128	—5,3		Трески, шум, очень неразборчивое вещание с большими искажениями	122	—5,5		
138	—5,5			128	—4,1		То же
139—153	<-6		Треск, шум	138	—4,5		Наложение двух программ вещания, одна из них с очень сильными искажениями
154	—6		На фоне суперного шума очень неразборчивое вещание				

показанных на рис. 50. Такими частотами, *кгц*, являются: 5; 6; 7,5; 9; 10; 12,5; 14; 20; 22,5; 23,9; 24,6; 27,9; 30; 30,6; 32,4; 34; 36,3; 36,8; 40; 43; 46; 47,2; 48; 50; 50,9; 52; 53,9; 55,5; 57,2; 58; 59; 60; 62; 64; 65,1; 66; 68,4; 70; 72; 72,4; 75,2; 77,2; 80,6; 83,2; 85; 86; 88,8; 91; 93; 95,2; 96,4; 99; 100; 101; 102; 103; 105,5; 106,2; 107; 108; 110; 114; 118; 119; 120; 121,5; 124; 126; 128,5; 130; 134; 137,5; 138; 143; 146; 149,3. На

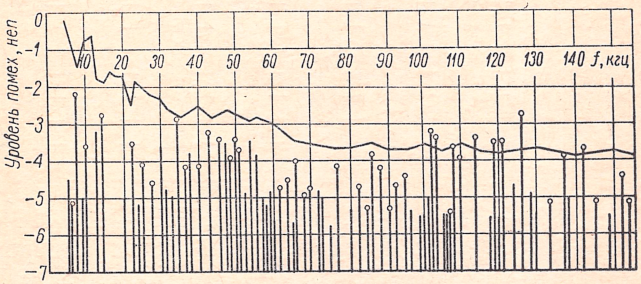


Рис. 50. Частоты с модулированными колебаниями от радиопередатчиков в линии 154 *кв* в ночное время.

рис. 50 они изображены вертикальными линиями. Кружками над линиями отмечены сигналы вещательных радиопередатчиков. Ломаная кривая показывает уровень помех в той же ЛЭП — 154 *кв* при наличии напряжения.

Меньшее количество помех от радиопередатчиков в линиях низших классов напряжения объясняется пониженным уровнем этих колебаний из-за меньшей высоты подвеса проводов, влияющей как действующая высота антенны.

17. ПОСТОЯНСТВО ЧАСТОТЫ ПОМЕХ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ И ИЗМЕНЕНИЕ ИХ УРОВНЯ

В линиях электропередачи каждого географического района помехи от радиопередатчиков занимают определенные полосы частот, зависящие от рабочих частот местных радиопередатчиков.

Помехи создаются радиопередатчиками, работающими на длинных и средних волнах и расположенными в радиусе 500 *км*. Например, в сетях Запорожской, Днепропетровской и близлежащих областей модулированные

Величина уровня радиосигналов

Частота принимаемого радиосигнала, *кгц*	Время							
	7^{10}	8^{15}	9^{30}	9^{40}	9^{50}	10^{50}	11^{30}	12^{00}
10	—4,9	—4,7	—4,6	—4,6	—4,3	—5,2	—4,4	—4,9
34	—5,3	—5,7	—5	—4,9	—5	—5,7	—5,2	—5
55	—5,5	—6	—5,5	—5,3	—6	—	—6	—5,2
68	—6	—6	—6,5	—6	—6	—4,8	—5,1	—4,4
102	—4,9	—5,2	—4,5	—4,9	—4,8	—5,4	—5,1	—4,8
122	—4,9	—5,2	—4,6	—4,9	—4,8	—5,4	—4,8	—4,6
128	—5,1	—5,8	—4,8	—4,9	—5	—	—6	—5
138	—5,2	—5,7	—5	—5,2	—5,4	—	—6	—5,2

сигналы занимают частоты 7, 9—10, 25, 31—35, 45, 46, 55—59, 68—70, 75—77, 96—98, 110—113, 119—123, 128—131, 138, 145—147 *кгц* и т. д. (рис. 37). В сетях Ставропольского края заняты частоты: 5, 7—8, 10, 13, 28, 45, 64, 68—70, 72, 88, 92, 97, 102, 140, 152 *кгц* и т. д. На этих частотах, как правило, прослушиваются три и более программы местного радиовещания.

Имеющиеся сведения о заполнении модулированными колебаниями спектра частот в электрических линиях еще недостаточны для определения закономерности преобразования частот местных радиопередатчиков. При выявлении этой закономерности требуется выполнить специальные измерения с применением приемных устройств высокого класса точности, рассчитанных на широкий диапазон частот.

Среди помех, занятых модулированными колебаниями, есть частоты устойчивого приема. Таковыми являются 10, 34, 55, 68, 102, 122, 128, 138 *кгц*. На этих частотах радиосигналы принимаются в любое время, когда работают местные радиостанции, при самом высоком уровне помех, создаваемых изоляторами.

Уровень модулированных колебаний на частотах устойчивого приема изменяется в течение суток сравнительно мало. В табл. 6 приведены результаты измерений уровня на указанных частотах в различные дни и в интервале времени с 7 до 24 *ч*. Эти данные свидетельствуют о небольшом отклонении уровня колебаний, измеренного в различные дни, от его среднего значения. Отклонение среднего значения составляет 0,4—0,6 *неп*, а в некоторые дни, при существенном изменении влажности воздуха, оно достигает

Таблица 6

в различное время суток

суток

12^{30}	14^{00}	15^{00}	17^{45}	20^{35}	21^{50}	22^{00}	23^{00}	23^{10}	24^{00}
—5,1	—4,1	—5,3	—4,7	—4	—5,2	—4,7	—4,2	—3,8	—3,4
—	—	—5,5	—5,7	—5,3	—5,2	—5,4	—4,5	—4,7	—3,4
—5,3	—4,6	—	—6	—6	—5	—4,5	—5	—4,7	—5,3
—6	—5,6	—4,1	—	—5,8	—4,9	—4,2	—4,7	—3,6	—5,3
—4,8	—	—4,9	—4,9	—4,9	—4,5	—4,7	—5,2	—3,6	—4,3
—4,8	—	—4,5	—4,8	—4,7	—4,8	—5	—5	—3,8	—4,6
—5,3	—4,3	—	—5,4	—5,5	—4,7	—5	—5	—5,1	—5,4
—5,2	—4,3	—6	—5,7	—5,7	—5	—4,8	—5	—4,5	—5,2

1 *неп*. В вечернее и в ночное время суток, когда условия распределения средних радиоволн улучшаются, уровень модулированных колебаний на некоторых частотах (10 и 34 *кгц*) значительно повышается.

Вследствие улучшения условий распространения средних радиоволн в линиях высокого напряжения в ночное время появляется большое число сигналов от дальних радиопередатчиков. Уровень таких помех иногда соизмерим с уровнем мешающих колебаний, происходящих от местных радиопередатчиков. Плотность заполнения спектра частот модулированными колебаниями в ночное время

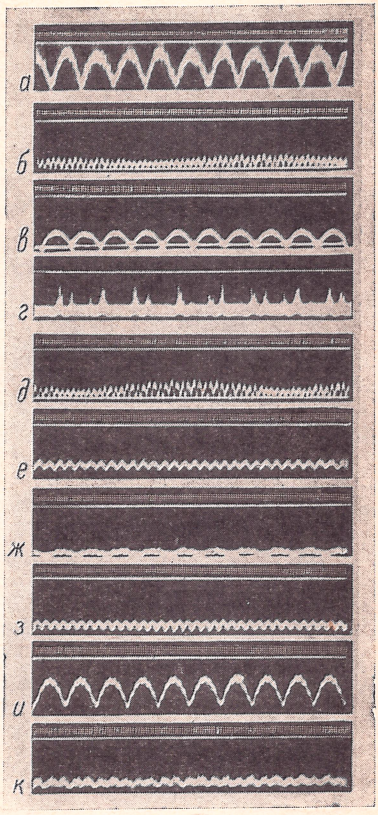


Рис. 51. Осциллограммы периодических колебаний уровня помех от радиопередатчиков в ночное время. Скорость записи — 25 *м/сек*.

Таблица 7

Данные о частоте (f), уровне (P) и периоде изменения уровня $T_п$ модулированных колебаний от радиопередатчиков на осциллограммах рис. 51

Обозначения	Единица измерения	Рис. 51										
		а	*б*	*в*	*г*	*д*	*е*	*ж*	*з*	*и*	*к*
f	*кгц*	7	42,8	47,5	68	74,8	77,8	95	117	120	150,5
P	*нп*	—2,2	—4,6	—4,5	—4,4	—4,7	—4,3	—3,5	—6,0	—3,7	—4,7
$T_п$	*сек*	0,29	0,052	0,29	0,36	0,052	0,082	0,29	0,082	0,29	0,082

наглядно показана на рис. 50. На некоторых частотах в вечернее время и на многих частотах ночью в линиях высокого напряжения имеется периодическая пульсация уровня модулированных колебаний. Амплитуда пульсации уровня в ночное время значительно больше.

В исследованной области спектра указанное явление наиболее часто наблюдается на частотах 36,5—37; 42,5 — 42,8; 46—47,7; 65,5—68,2; 74—74,8; 95; 119—120; 143; 150—150,5 *кгц* (рис. 51). Осциллограммы (рис. 51) сделаны с помощью шлейфового осциллографа типа МПО-2 по схеме, изображенной на рис. 14. Отметками времени на них являются положительные полуволны 50-периодного напряжения, расположенные в верхней части записи. Данные осциллограмм сведены в табл. 7.

По осциллограммам установлено, что на частотах 7;47,5; 84; 95 и 121 *кгц* (рис. 51, *а*, *в*, *ж*, *и*) в линиях различного класса напряжения имеются периодические изменения уровня модулированных колебаний с периодом пульсации $T_п = 0{,}29$ *сек*. На частотах 77,8; 117 и 150,5 *кгц* (рис. 51, *е*, *з*, *к*) $T_п = 0{,}082$ *сек*, а на частотах 42,8 и 74,8 *кгц* (рис. 51, *б*, *д*)—$T_п = 0{,}052$ *сек*.

Кроме обычного периодического колебания уровня мо-

дулированных помех с равными амплитудами (рис. 51, *а*, *и*), наблюдаются сложные колебания. Так, на рис. 51, *б*, *д* накладывается дополнительное колебание с периодом около 2 *сек*, а на рис. 51, *и* — с периодом 0,04 *сек*. Встречается также циклическое появление сигнала (рис. 51, *г*).

В различные дни измерений период колебания уровня модулированных помех в линиях различного класса напряжения остается неизменным. Заметим, что форма кривой пульсирующего уровня модулированных колебаний отличается от синусоидальной кривой. Наиболее ярко она выражена на осциллограммах с большой амплитудой колебания уровня (рис. 51, *а*, *в*, *и*). Этому процессу свойственна плавная тупая форма кривой в периоды максимумов уровня и острый изгиб кривой в период минимумов уровня.

Существование периодического изменения уровня радиосигналов преимущественно ночью объясняется улучшением распространения средних радиоволн. Благодаря прохождению средних радиоволн от дальних передатчиков в линиях высокого напряжения появляется большое количество дополнительных колебаний на частотах работы дальних передатчиков. В результате преобразования этих колебаний в нелинейных элементах высоковольтной линии сигналы переходят из диапазона радиочастот в диапазон единиц и десятков килогерц. При увеличенном количестве сигналов существует большее число близких частот, которые вступают в биения, периодически изменяя уровень рассматриваемых помех.

18. ЗНАЧИМОСТЬ ПОМЕХ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ В ЛИНИЯХ РАЗЛИЧНОГО КЛАССА НАПРЯЖЕНИЯ

В линиях различного класса напряжения, расположенных в одной местности, уровень помех от радиопередатчиков неодинаков. Это легко проследить по кривым, приведенным на рис. 37. Для пяти занятых модулированными колебаниями полос частот 58—59, 72—77, 95—98, 110—112, 128—131 *кгц* уровень помех для сетей 35, 6—10 и 0,4 *кв* сведен в табл. 8. В таблице отчетливо заметна зависимость уровня помех от класса напряжения линии. Так, в линиях 35 *кв* уровень в среднем равен от —1,8 до —2,5 *неп*, в линиях 6—10 *кв* — от —3 до —4 *неп*, в сетях 0,4 *кв* — от —5,4 до —6 *неп*.

Таблица 8

Влияние класса напряжения линии на уровень помех от радиопередатчиков

Сеть, *кв*	Уровень помех (*неп*) при частоте (*кгц*)				
	58—59	72—77	95—98	110—112	128—131
35	—2,6	—2,2	—2,4	—2,0	—1,1
6	—3,5	—5,3	—2,8	—3,9	—2,5
0,4	—6,9	—6,5	—3,9	—3,95	—3,3

Помехи от радиопередатчиков влияют по-разному на каналы связи, работающие по линиям различного класса напряжения. Наибольшую значимость они имеют в сетях 0,4 *кв*, где уровень импульсных помех от изоляторов сравнительно низкий (рис. 37, *в*). Здесь рассматриваемые помехи преобладают на частотах свыше 40 *кгц*, вызывая резкие перепады кривой уровня, достигающие 4 *неп*. В сетях 6 и 10 *кв*, где уровень импульсных помех несколько выше, чем в сетях 0,4 *кв*, помехи от радиопередатчиков преобладают на частотах свыше 50 *кгц*. По этой причине перепады уровня помех несколько меньше. В сетях 35 *кв* помехи от радиопередатчиков имеют еще меньшую значимость. Они занимают более узкие полосы частот, вызывают меньшие перепады уровня и выступают в качестве преобладающих помех на частотах свыше 70 *кгц* (рис. 37, *а*). В линиях 154 *кв* (система Днепроэнерго) модулированные колебания от радиопередатчиков с трудом прослушиваются среди сплошных помех, однако на частотах 102, 113, 120, 127 *кгц* их уровень несколько превосходит помехи от коронирования и частичных разрядов (рис. 50).

19. ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ ПРИСОЕДИНЕНИЯ К ЛИНИИ

Большое количество проведенных измерений помех от радиопередатчиков показало, что указанные выше закономерности имеют место при схеме присоединения «фаза — земля».

При схеме измерения «фаза — фаза» количество частот, на которых наблюдаются помехи от местных радиопередатчиков, значительно меньше. Уровень их ниже на 3—4 *неп* и, как правило, неустойчив.

20. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ПОМЕХ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Природа образования низкочастотных помех от радиопередатчиков в линиях высокого напряжения известна лишь в общих чертах. Механизм явления до настоящего времени остается недоказанным.

Установлено, что рассматриваемые помехи происходят преимущественно от длинноволновых местных передатчиков, расположенных в радиусе до 500 *км*, в зависимости от их мощности. Коротковолновые и ультракоротковолновые передатчики не создают в ЛЭП мешающих колебаний на частотах десятков и сотен килогерц, если даже они расположены в непосредственной близости (несколько километров от линии).

Сущность происхождения помех от радиопередатчиков заключается в следующем. Радиоволны от местного передатчика возбуждают в проводах высоковольтной линии колебания. Э.д.с. от местных радиопередатчиков наводятся за счет прямых радиоволн, а не отраженных, так как в противном случае их уровень ночью был бы значительно выше, чем днем. Так как каждый местный передатчик может наводить в проводах высоковольтной линии э.д.с. только лишь на его рабочей частоте, то появление модулированных колебаний с его программой на частотах единиц и десятков килогерц может происходить вследствие частотного преобразования.

Если бы в ЛЭП имелись только линейные элементы, то амплитудно-модулированные колебания в них существовали лишь на частотах радиопередатчиков и частотные преобразования этих колебаний были бы исключены. Однако опыт, поставленный проф. Б. В. Смирновым в 1952 г., показал, что при наличии в сети 6 *кв* сигналов от двух высокочастотных генераторов в подключенных по схеме «провод — земля», сигналы непременно взаимодействуют, создавая мешающие колебания как на меньших, так и на более высоких частотах.

Факт существования в линиях высокого напряжения модулированных колебаний на частотах единиц и десятков килогерц свидетельствует о частотном преобразовании э.д.с., наводимых радиоволнами от радиопередатчиков в проводах ЛЭП. Наиболее яркое проявление этого процесса в цепи «провод — земля» и незначительное в цепи «провод —

провод» дает основание предполагать о существовании нелинейности в элементах цепи «провод — земля».

Чтобы ответить на вопрос, какая из деталей линии высокого напряжения обладает нелинейностью, обратимся к следующим установленным закономерностям.

1. На всех линиях высокого напряжения, имеющих металлические, железобетонные, деревянные или комбинированные опоры, рассматриваемые помехи существуют в равной степени. Следовательно, материалы опор и, в частности, окислы металлов в местах контакта «металл — металл», «дерево — земля» и прочие не влияют на образование нелинейности.

2. На новых линиях, еще не бывших под напряжением, помехи от радиопередатчиков на частотах единиц и десятков килогерц не наблюдаются. Однако их уровень постепенно увеличивается в процессе работы ЛЭП и уменьшается при длительном отключении напряжения и при сырой погоде. На старых ЛЭП они существуют стабильно, независимо от присутствия напряжения.

Следует полагать, что нелинейность приобретается поверхностной пленкой, образующейся на изоляторах за счет налета нерастворимых осадков на них, что однако еще не является доказанным.

21. МЕТОДЫ УЧЕТА ПОМЕХ ОТ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ

Помехи от радиопередатчиков представляют интерес с точки зрения правильного выбора рабочих частот каналов, организуемых по линиям 0,4—35 *кв*. Они рассматриваются в направлении разработки методики расчета частоты и уровня мешающих колебаний. Совпадение рабочих частот канала с частотами, занятыми помехами от местных радиопередатчиков, должно быть исключено на этапе проектирования канала. Однако в настоящее время объем имеющихся сведений недостаточен для создания методики расчета помех от радиопередатчиков.

Если рабочие частоты канала попадают в полосу, заполненную модулированными колебаниями от местных радиопередатчиков и нормальная работа невозможна, целесообразно перестроить аппаратуру высокочастотного канала связи на другие рабочие частоты. В случае занятости всех

частот другими каналами имеется возможность, не перестраивая аппаратуру, перейти на работу по схеме «фаза — фаза».

Когда уровень модулированных колебаний превосходит уровень помех на соседних частотах на 2—2,5 *неп*, рабочие частоты канала необходимо смещать относительно полос, занятых указанными помехами, не менее чем на 2 *кгц*. Если разница уровней составляет 3—4 *неп*, рабочие частоты канала необходимо смещать не менее чем на 5 *кгц*, а при большей разнице уровней — смещать на 10 *кгц* [10].

V. ПОМЕХИ, НАРУШАЮЩИЕ РАБОТУ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАНАЛОВ, И МЕТОДЫ ОТЫСКАНИЯ ИХ ИСТОЧНИКОВ

22. ПРИЗНАКИ ПОМЕХ ПРИ НОРМАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИИ

Опыт высокочастотной связи по проводам линий электропередачи показал, что при появлении очага интенсивных помех в линии или в силовом оборудовании подстанции каналы телефонной связи и телемеханики выходят из строя. Практика убеждает в необходимости периодического наблюдения за состоянием изоляции на подстанциях 35/6—10 *кв*с целью своевременного выявления интенсивного очага разрядов.

Чаще всего очагами интенсивных помех на линиях являются изоляторы как линейные, так и на разъединителях, находящиеся в стадии предпробойного состояния. Мощный источник помех представляет также процесс искрения в местах плохого контакта грозозащиты и заземляющих устройств на линии и арматуре разъединителей.

Очаги интенсивных помех на подстанциях 35/6—10 *кв* могут быть в изоляторах, грозозащитных элементах, в изоляции силовых трансформаторов, трансформаторов тока с фарфоровой изоляцией и прочих элементах.

Очаг помех может находиться и в элементах высоковольтного устройства присоединения к ЛЭП. Например, имелся случай, когда конденсатор связи заключал в себе мощный

источник помех, который был обнаружен после длительных и весьма сложных поисков. Он образовался на слабо подтянутом зажимном болте, соединяющем конденсатор связи с шинкой, идущей к фильтру присоединения.

Многолетней практикой установлено, что по высокочастотным помехам можно контролировать состояние изоляции высоковольтных устройств. Однако на пути реализации этой возможности существенное препятствие представляет процесс коронирования на проводах и арматуре высоковольтных установок. При изучении помех в некоронирующих линиях 0,4—35 *кв*, где указанное препятствие исключено, обнаружена возможность прогнозирования состояния изоляции по высокочастотным колебаниям, свойственным изоляторам ЛЭП.

В первых двух главах было показано, что помехи, возникающие от частичных разрядов на изоляторах ЛЭП, непременно сопутствуют работе изоляции при высоком напряжении. При исследовании обнаружены специфические признаки, свойственные нормальному состоянию изоляции в трехфазных установках. Благодаря этим признакам имеется возможность отличить помехи, создаваемые нормальными изоляторами от всех остальных высокочастотных колебаний в ЛЭП.

Главным отличительным признаком нормального состояния изоляции трехфазных установок является неизменная частота следования всплесков высокочастотного напряжения помех, равная 300 *1/сек*. Как уже отмечалось в гл. II, за каждый период напряжения промышленной частоты возникает шесть серий колебательных импульсов или всплесков помех, сопровождающих частичные разряды в изоляторах линии. При этом разряды образуются в периоды максимумов напряжения обеих полярностей в каждой фазе. Поэтому при двух сериях разрядов, возникающих при положительном и отрицательном максимуме напряжения в каждой фазе, за период 50 *гц* в трехфазных ЛЭП сочетаются шесть всплесков помех, имеющих частоту следования 300 *1/сек* (рис. 16, *а*; 17, *а*; 18, *а*). Такая форма высокочастотных помех соответствует нормальному состоянию изоляции. При существенном изменении погоды форма помех может менять свой вид до взаимного слияния всплесков, как показано на рис. 16, *е*; 17, *е*; 18, *г*. Однако важно отметить то свойство нормального состояния изоляции, что амплитуды всех шести всплесков остаются соизмеримыми. Следова-

тельно, шестиимпульсная (за период 50 *гц*) система соизмеримых по амплитуде всплесков помех является основным признаком нормального состояния изоляции ЛЭП. Этот признак имеет и другие показатели. Как уже отмечалось в гл. II, на выходе детектора приемника амплитудно-модулированных сигналов высокочастотное напряжение от изоляторов ЛЭП образует периодическую последовательность низкочастотных импульсов (рис. 33, 34). Частота их следования равна 300 *1/сек*, а спектр содержит составляющие 300, 600, 900 *гц* и т. д. (рис. 35). Эта закономерность спектральной структуры импульсов помех на выходе детектора использована в искателе дефектных изоляторов в качестве фактора отличия от спектра импульсов при наличии в ЛЭП очага интенсивных частичных разрядов поврежденной изоляции.

Вторым по значимости признаком нормального состояния изоляции ЛЭП является величина уровня помех. Большое число проведенных измерений уровня в распределительных сетях 0,4—35 *кв* дало возможность установить определенные границы его значений для нормального состояния изоляции. Обобщенные результаты измерения уровня при различных атмосферных условиях сведены в табл. 1.

Следует отметить, что попытки многих исследователей использовать этот признак в качестве основного критерия оценки состояния изоляции на линиях электропередачи не окончились успешно. Препятствием явились сложная зависимость уровня помех от атмосферных условий и весьма большие границы его изменения. Поэтому второй признак — соответствие определенного уровня высокочастотных помех нормальной изоляции — следует использовать в качестве дополнительного фактора при контроле изоляции.

23. ПРИЗНАКИ ПОМЕХ ПРИ НАЛИЧИИ В ЛИНИИ ИНТЕНСИВНОГО ИСТОЧНИКА РАЗРЯДОВ

Многолетними наблюдениями за помехами на ЛЭП установлено, что уровень высокочастотных колебаний от изоляторов можно подразделить на «нормальный» и «аномальный» [48, 63, 64]. «Нормальным» считается такой

уровень, который имеет место при вполне исправном состоянии изоляции. Под «аномальным» понимается значительно возросший уровень вследствие неисправного состояния изоляции ЛЭП. Однако этот фактор признан не вполне надежным для оценки состояния изоляции линии. Причины, определяющие ненадежность этого признака, рассмотрены несколько ниже.

Специально организованные автором исследования помех в электрических линиях 10 и 35 *кв* выявили более надежный признак для определения источника интенсивных разрядов в поврежденной изоляции. Таким признаком является форма всплесков помех и как следствие их — частотная структура составляющих напряжения на выходе приемника [28].

Приемник необходимо настроить на частоту, где помехи от изоляторов преобладают над высокочастотными колебаниями от других источников (табл. 2 и 5). При массовых экспериментах в указанных сетях обнаружена постоянная область частот 17—22 *кгц* с подъемом уровня помех от изоляторов на 1—3 порядка.

Форма напряжения импульсов на выходе приемника, настроенного на указанные частоты, являясь производной от всплесков линейного напряжения помех, имеет своеобразный спектр частот, по которому можно определить присутствие интенсивного источника помех. Этот признак дает повышенную надежность оценки состояния изоляции в линии благодаря обнаруженной и спектральной особенности. Одним из главных достоинств его является то, что объективность оценки не теряется даже при значительных изменениях атмосферных условий.

Для пояснения сказанного сравним форму высокочастотных помех при нормальных изоляторах линии, показанную на рис. 16, *а*, и форму помех в линии при наличии интенсивного очага частичных разрядов в дефектном изоляторе на рис. 52. На рис. 16, *а* за период 50 *гц* имеется шесть почти одинаковых всплесков помех, свидетельствующих об одинаковой интенсивности частичных разрядов в изоляторах всех трех фаз линии. Заметим, что при существенном изменении погодных условий, когда происходит значительное увеличение интенсивности частичных разрядов во всех изоляторах ЛЭП, измеритель помех может показать «аномальный» уровень, хотя во всех трех фазах содержатся нормальные изоляторы, создающие одинаково большой уро-

вень высокочастотных помех. Например, это бывает при увлажнении сильно запыленных изоляторов, когда уровень помех резко возрастает и может признаваться «аномальным». Поэтому метод определения состояния изоляции по увеличенному уровню помех от изоляторов не может считаться

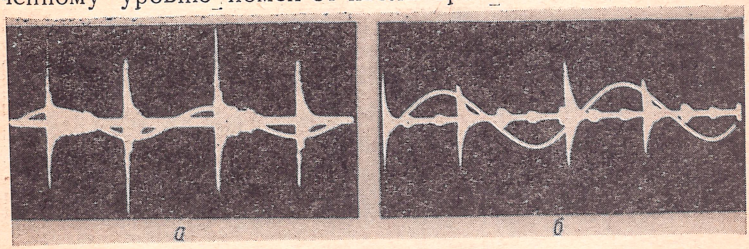


Рис. 52. Осциллограмма высокочастотного напряжения помех в ЛЭП относительно кривой 50-периодного напряжения при наличии интенсивного очага разрядов, расположенного на объекте измерений (*а*) и находящегося на расстоянии 9 *км* (*б*).

достоверным и достаточно надежным. Оценка же по спектральному признаку обладает высокой надежностью благодаря иной форме и частоте следования всплесков помех, создаваемых очагом интенсивных разрядов в дефектной изоляции.

При наличии в линии дефектного изолятора были обнаружены специфические качества помех от очага интенсивных разрядов. Например, форма напряжения высокочастотных помех в ЛЭП при наличии интенсивного очага разрядов характеризуется тем, что среди обычных шести всплесков два из них увеличены в десятки и сотни раз (рис. 52). Они возникают в моменты максимумов напряжения обеих полярностей той фазы, в которой находится источник интенсивных разрядов. Поэтому частота их следования составляет 100 *1/сек* [28].

Поскольку одновременное появление в одном месте двух или трех таких очагов равной интенсивности имеет ничтожно малую вероятность, то определение очага интенсивных разрядов среди остальных разрядов с меньшей интенсивностью, свойственных для нормальной изоляции, является надежным средством индикации при любом уровне помех в некоронирующих ЛЭП.

Исследования спектральной структуры колебаний на выходе приемника амплитудно-модулированных сигналов выявили возможность надежного определения очага интенсивных

разрядов по форме выходного напряжения. Если при нормальных изоляторах на выходе приемника имеет место последовательность импульсов с частотой 300 *1/сек* (рис. 53,*а*), то при наличии в ЛЭП очага интенсивных разрядов на выходе

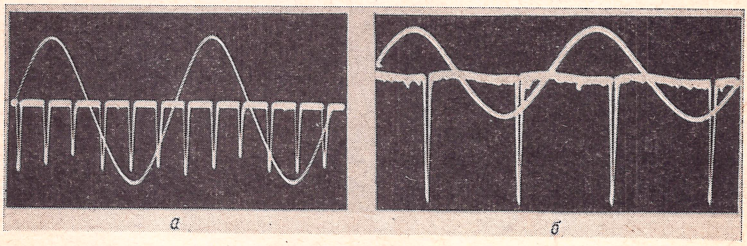


Рис. 53. Осциллограмма напряжения помех на выходе приемника относительно кривой 50-периодного напряжения при:
а — нормальных изоляторах линии; *б* — наличии в линии дефектного изолятора.

приемника импульсы следуют с частотой 100 *1/сек* (рис. 53, *б*). При нормальных изоляторах в ЛЭП последовательность импульсов на выходе приемника содержит спектр составляющих 300, 600, 900 *гц* и т. д. (рис. 35), а при наличии в ЛЭП дефектного изолятора — составляющие 100, 200, 300 *гц* и т. д. (рис. 54) или 50, 100, 150, 200 *гц* и т. д., если интенсивные разряды происходят только за одну полярность высокого напряжения, обычно в начале развития дефекта.

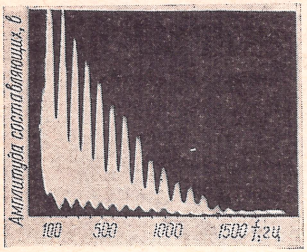


Рис. 54. Спектрограмма составляющих напряжения на выходе приемника при наличии в линии 10 *кв* дефектного изолятора.

Эти данные дали возможность сконструировать избирательный искатель, реагирующий на высокочастотные колебания от очага интенсивных разрядов, и в то же время нечувствительный к нормальному процессу разрядов в изоляции трехфазных систем [31]. Это достигнуто за счет выделения из спектра частот на выходе приемника составляющей 100 *гц* и подавления всех остальных составляющих.

24. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕНОРМАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ И ОЧАГА ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ

Появившийся в канале высокочастотной связи большой уровень помех во многих случаях является сигналом ненормального состояния изоляции на линии или в оборудовании подстанции.

Это подтверждается опытом эксплуатационного персонала системы «Днепроэнерго», а также многочисленными наблюдениями автора за установками связи в сельских распределительных сетях Запорожсельэнерго. При наличии сильно развитой системы связи по ЛЭП Центральная служба связи «Днепроэнерго» по помехам в каналах достаточно точно определяет аварийное состояние изоляции, указывая при этом не только линию, но и наиболее вероятный район нахождения источника помех.

Однако, полагаться лишь на факт резко возросшего уровня помех в канале нельзя, так как помехи могут происходить и по причине неисправностей в самой аппаратуре высокочастотной связи.

Наиболее надежным средством проверки состояния изоляции на ЛЭП является контроль по числу всплесков высокочастотного напряжения помех, наблюдаемых с помощью электронного осциллографа, присоединенного к высокочастотному кабелю на вход поста. При нормальном состоянии изоляции ЛЭП и подстанции на экране осциллографа наблюдается форма помех, показанная на рис. 16. При неисправном состоянии изоляции изображение на экране осциллографа имеет форму, показанную на рис. 52.

В случае обнаружения неисправного состояния изоляции, когда действует очаг интенсивных разрядов, можно без дополнительных приборов ориентировочно определить его расположение. Однако иногда поиск очага интенсивных разрядов очень сложен, поэтому целесообразно описать наиболее характерные, типичные методы его определения.

Пример 1. Между подстанцией 35/10 *кв* КИМ системы Запорожсельэнерго и колхозом «Украина» Днепропетровской области в 1964 г. организован высокочастотный канал по ЛЭП—10 *кв*. Расстояние между пунктами связи по линии составляет 18 *км*. Фидер, по которому работает канал связи, не имеет высокочастотной обработки, поэтому рабочие токи канала распространяются по всей сети 10 *кв*, состоящей

из пяти фидеров общей длиной 124 *км*. К сети присоединено 60 трансформаторов с суммарной мощностью 3750 *ква*.

После наладки канала он работал с отличным качеством передачи. Две недели спустя появились столь мощные помехи, что работа связи стала невозможной. Другой канал связи, работающий на той же подстанции КИМ, но по ЛЭП—35 *кв*, функционировал по-прежнему нормально. Местные жители заметили, что в сырую погоду вещательные приемники стали забиваться сильными шумами. Убедившись в полной исправности обеих постов, стало ясно, что в сети 10 *кв* действует мощный источник высокочастотных помех.

На подстанцию был доставлен электронный осциллограф и подключен к высокочастотному кабелю, соединяющему данный пост с устройством присоединения 10 *кв*. По изображению на экране осциллографа убедились в правильности предположения: вместо шести всплесков помех за каждый период 50 *гц* на экране осциллографа имелось изображение только двух всплесков. Амплитуда этих всплесков с частотой 100 *гц* была столь велика, что всплески от изоляторов двух других фаз линии были несоизмеримо малы и поэтому не просматривались (рис. 52,а).

Чтобы ориентировочно узнать дальность расположения источника разрядов, была измерена амплитуда всплесков. Относительно напряжения контрольного сигнала осциллографа она составляет 150 *в*, а относительно выходного напряжения передатчика поста — 30 *в*, измеренного при наладке канала две недели назад, амплитуда всплесков составила около 140 *в*.

Аналогичные измерения с помощью осциллографа, сделанные на противоположном конце рассматриваемого канала спустя 2 часа, показали, что на выходе поста в колхозе «Украина» амплитуда всплесков составила около 30 *в*. Из этих данных стало ясно, что источник помех находится или на линиях 10 *кв* недалеко от подстанции, или в оборудовании подстанции.

Чтобы определить линию, на которой имеется очаг разрядов, кратковременно отключили каждый фидер 10 *кв*, замечая, исчезают ли при этом на экране осциллографа помехи от мощного источника. При последовательном погашении напряжения на каждом фидере обнаружено исчезновение помех при отключении фидера, питающего село Николай-Поле. Для определения на этом фидере места нахождения очага помех требовалось с помощью линейных разъединителей отключать напряжение по участкам, начиная с дальнего. При отключении с магистрального участка фидера запрашивали подстанцию об исчезновении помех посредством внутрирайонной связи. В результате установили присутствие очага помех на ближайшем к подстанции участке фидера. Путем отключения фидера от подстанционного оборудования было обнаружено расположение очага помех в оборудовании подстанции. Путем пофазной проверки поврежденного фидера было найдено, что очаг помех находится в трансформаторе тока ТПФМ-10 зав. № 33523.

После замены последнего, уровень помех на шинах 10 *кв* подстанции КИМ упал до нормального и на экране осциллографа стала наблюдаться обычная система из шести соизмеримых всплесков помех, уровень которых на несколько порядков ниже уровня несущей частоты передатчика поста. Работа канала связи стала нормальной.

Пример 2. Эксплуатационный персонал Калининского сетевого района Запорожсельэнерго, регулярно пользующийся каналом высо-

кочастотной связи заметил, что в сырую погоду на подстанции 35/10 *кв* Юльевка наблюдается резкое увеличение помех в телефонном канале, существенно ухудшающих качество передачи сообщений.

По линиям 35 *кв* сетевого района организована высокочастотная связь между подстанциями 35/10 *кв* Лежино, Юльевка, Орехово и Васильевка, из которых узловой является подстанция Юльевка. От нее отходят радиальные линии на подстанции Орехово, Васильевка и Рыбхоз. Последняя подстанция не имеет высокочастотной связи и осуществляет диспетчерские сообщения с помощью проводной линии и районного коммутатора. Чтобы определить справедливость жалоб на мешающее действие помех на подстанции Юльевка был сделан выезд в тот день, когда в канале устойчиво держались повышенные помехи.

Подключенный к высокочастотному кабелю осциллограф Э0-7 показал, что среди шести всплесков помех, за каждый период 50 *гц*, имеется один с весьма большой амплитудой (около 4,5 *в*), превышающий амплитуду нормальных всплесков в 25—30 раз, а между большими всплесками вдвое меньший по амплитуде (рис. 52,б). По сравнению с нормальными всплесками амплитуда увеличенных всплесков помех держится неустойчиво, временами достигая весьма больших значений.

Предполагались две причины: 1) интенсивный очаг помех находится в ЛЭП—35 *кв* на расстоянии, более близком к узловой подстанции, чем к остальным, так как в противном случае помехи ощущались бы в высокочастотном канале и на остальных подстанциях; 2) источник интенсивных помех находится или на шинах 10 *кв* подстанции, или на линиях 10 *кв* недалеко от подстанции. Чтобы исключить второе предположение был произведен опрос радиослушателей, живущих рядом с ЛЭП—10 *кв*. В результате убедились, что близко расположенные от жилых домов линии 10 *кв* не вызывают нареканий на качество радиоприема. Это сняло подозрения на присутствие очага интенсивных помех в сети 10 *кв*.

Было принято решение организовать поочередное отключение линий 35 *кв* для определения объекта дальнейших поисков. Намеченная операция поочередного отключения трех радиальных линий была проведена в один из осенних дней, когда наблюдалось устойчивое действие помех в канале. Отключение трех линий 35 *кв* в общей сложности заняло 35 *мин*, из которых каждая линия отключалась на полторы-две минуты.

С помощью осциллографа, подключенного к высокочастотному кабелю поста на открытой части подстанции, было обнаружено, что исчезновение повышенного уровня помех произошло при отключении линии, питающей подстанцию Рыбхоз.

Поиски очага помех на линии 35 *кв* Юльевка—Рыбхоз производились с помощью искателя помех типа ИСП-24 и измерителя помех типа ИП-12М. Поиск осуществлялся путем обхода линии с обоих ее концов. Оба обходчика безошибочно определили наличие мощного очага помех на опоре № 118. Измеритель помех ИП-12М под этой опорой показал около 30000 *мкв* на частоте измерений 249 *кгц* (частота наименьшего уровня помех от радиопередатчиков в линиях Запорожской области). При измерениях использовались штыревая антенна высотой 1 м. Искатель помех типа ИСП-24 под той же опорой показал 8000 *мкв* на штыревую антенну высотой 0,5 *м* при той же частоте настройки.

По сообщению жителей села Царь-Кут, где проходит обследуемая ЛЭП—35 *кв*, на одном из изоляторов опоры № 118 ночью, особенно

в сырую погоду и при тумане, наблюдается свечение и искрение. В домах, расположенных около линии 35 *кв* на расстоянии до 100 *м*, радиоприем заглушается сильными шумами и треском. Следует заметить, что местные жители во многих случаях безошибочно указывают место расположения очага интенсивных разрядов на ЛЭП—6,10 и 35 *кв* по длительно действующим шумам в радиоприемниках. Известны несколько случаев, когда очаг интенсивных помех на ЛЭП—6 и 10 *кв* в течение нескольких месяцев не позволял пользоваться радиоприемником, и это явление прекращалось после пробоя изолятора.

Пример 3. 25 октября 1966 г. на подстанции Днепро—Донбасс (система Днепроэнерго) производились измерения и осциллографирование помех от коронирования под разъединителями 330 *кв*.

Сигналы помех принимались с помощью рамочной антенны, поднятой на высоту 2 *м* от поверхности земли, и подавались на вход электронного осциллографа. Место измерений было выбрано по максимальному звуку коронирования на стержнях разомкнутых разъединителей обходной системы сборных шин подстанции.

За каждый период кривой 50 *гц* на экране осциллографа наблюдались три ярко выраженных всплеска помех большой амплитуды с частотой следования 150 1/сек, а между ними меньшие в 10—15 раз всплески от изоляторов с частотой следования 300 1/*сек*. Такая форма напряжения помех от короны соответствует данным многих авторов. В полдень на экране осциллографа внезапно появились всплески значительно большего уровня с частотой следования 100 1/*сек*. Их амплитуда превышала всплески от короны в 30—50 раз и составляла около 170 *в*. Канал связи по ЛЭП—330 *кв* в это время не мог работать. Разряды от мощного источника наблюдались весьма стабильно в течение часа и свидетельствовали о существовании очага поврежденной изоляции. Этот характерный для неисправного состояния изоляции признак быстро подтвердился: изоляция на шинах 330 *кв* подстанции пробилась на следующие сутки.

25. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОТЫСКАНИЯ ИСТОЧНИКА ИНТЕНСИВНЫХ ПОМЕХ

Применение осциллографа

Любой электронно-лучевой осциллограф является надежным средством для определения присутствия в сети очага интенсивных разрядов. С помощью него можно не только наблюдать форму высокочастотного напряжения помех и определять частоту всплесков, но и ориентировочно измерять их амплитуду.

Контроль состояния изоляции с помощью осциллографа можно осуществлять не только на подстанциях, имеющих высоковольтные конденсаторы связи, но и на объектах, не имеющих таковых. Для этого на вход осциллографа высокочастотное напряжение подается с рамочной антенны. Ан-

тенна выполняется из обмоточного провода типа ПЭВ или ПЭ диаметром 0,2—0,3 *мм*, который наматывается на квадратную деревянную крестовину 40 × 40 *см* или круглый каркас из изоляционного материала диаметром 30—35 *см* в количестве 800—1000 витков. Рамка укрепляется на легком деревянном бруске высотой 1—1,5 *м*. Такая антенна обладает двухсторонней направленностью, поэтому при ее использовании необходимо выбирать наивыгоднейшую ориентировку по максимальному уровню.

С помощью осциллографа с рамочной антенной можно столь же быстро определить объект с интенсивным источником помех, как на подстанции с установленным конденсатором связи. При этом рамочная антенна имеет преимущество перед использованием конденсатора связи, дающая возможность быстро проверить состояние изоляции как на стороне 10 *кв*, так и на стороне 35 *кв*. Это достигается путем размещения рамочной антенны и осциллографа под сборными шинами подстанции 10, а затем 35 *кв* и наблюдения на экране осциллографа формы помех, применяя описанную выше методику.

Портативный осциллограф С1-35, выполненный на полупроводниках и имеющий автономное питание, будучи снабженный рамочной антенной и перевозимый на автомашине (без экранирования металлическим покрытием), можно использовать для отыскания на линии очага интенсивных разрядов. Последний определяется по наибольшему напряжению всплесков с частотой 100 *1/сек* при движении автомашины вдоль линии на постоянном удалении от нее (5—15 *м* от оси линии).

Чтобы измерить осциллографом частоту следования всплесков высокочастотного напряжения помех от изоляторов, необходимо научиться пользоваться переключателем диапазонов «частота развертки» так, чтобы, подавая на вход осциллографа контрольный сигнал 50-периодного напряжения, установить на экране два полных периода напряжения 50 *гц* или один полный период. После этого необходимо отключить контрольный сигнал и, не перемещая ручек управления разверткой и синхронизацией, подать на вход осциллографа напряжение от высокочастотного кабеля, соединенного с конденсатором связи, или подключить рамочную антенну. В первом случае, когда частотой синхронизации на осциллографе установлен масштаб 2-х периодов 50 *гц*, на его экране наблюдается 12 всплесков

помех (рис. 16, *а*), во втором случае — шесть всплесков (характерная для нормального состояния изоляции частота 300 *1/сек*). Когда в линии действует интенсивный источник разрядов, то вместо частоты 300 *1/сек* наблюдается ярко выраженная частота всплесков 100 *1/сек*, имеющих значительно большую амплитуду, чем всплески от нормального процесса разрядов с частотой 300 *1/сек*.

Для определения с помощью осциллографа амплитуды всплесков помех, необходимо пользоваться методом сравнения их с известной величиной напряжения контрольного сигнала, ослабляемого входным аттенюатором. Измерения производятся в следующем порядке. На вход осциллографа подается измеряемое напряжение высокочастотных помех и по масштабной сетке, прикладываемой к экрану осциллографа, измеряют высоту всплеска помех (в *мм*) относительно нулевой линии, замечая при этом показатель ослабления на входном аттенюаторе. Не изменяя величину установленного усиления по вертикали и пользуясь лишь ослаблением сигнала входным аттенюатором, на вход осциллографа подают напряжение контрольного сигнала 50 *гц* известной амплитуды и измеряют высоту точки максимума кривой 50 *гц* относительно нулевой линии. Амплитуду всплеска помех определяем по формуле

$$U = \frac{U_к h K}{h_к K_к},$$

где $U_к$ — амплитудное значение контрольного напряжения 50 *гц*, *в*; h — высота всплеска помех, *мм*; $h_к$ — высота точки максимума контрольного напряжения 50 *гц*, *мм*; K— число, показывающее во сколько раз ослаблен сигнал входным аттенюатором осциллографа; $K_к$ — число, показывающее во сколько раз ослаблено контрольное напряжение (50 *гц*) входным аттенюатором.

Применение измерителей и искателей помех

Для поиска интенсивного источника помех на линиях высокого напряжения требуются специальные приборы с автономным питанием от батарей.

Отечественная промышленность выпускала два типа широко распространенных приборов подобного назначе-

ния — измеритель помех типа ИП-12М и искатель сетевых помех типа ИСП-24.

Методика применения указанных приборов достаточно хорошо изложена в заводской инструкции. Применение их для обхода линии высокого напряжения оказалось затруднительным из-за большого веса (ИП-12М весит 15 *кг*, ИСП-24 — 7,5 *кг*).

В настоящее время отечественная промышленность осваивает выпуск портативных измерителей помех на полупроводниках с экономичным питанием. Для рассматриваемой цепи наиболее подходящими приборами являются измерители помех на диапазон частот 150—20 000 *кгц*. Однако наивыгоднейшим аппаратом для отыскания дефектной изоляции является измеритель помех, работающий в низкочастотном диапазоне, перекрывающем область частот 10—150 *кгц*.

Как уже указывалось, оптимальной областью для линий 6—10 *кв* является 17—19 *кгц*, для линий 35 *кв* — 18—20 *кгц* и для линий 110—154 *кв* — 19—22 *кгц*, где уровень колебаний от изоляторов всегда увеличен на 1—2 порядка по сравнению с уровнем на соседних частотах. Несмотря на то, что указанные измерители помех реагируют на всю совокупность помех в ЛЭП, они могут с успехом применяться на линиях, не имеющих коронирования. В случае же новых линий 10 и 35 *кв*, которые в период «старения» проводов могут иметь при некоторых атмосферных условиях коронирование на заусеницах и царапинах проводов, применение этих приборов дает ложные результаты. В этом случае для безошибочного поиска очага мощных разрядов необходимо применять портативный осциллограф с рамочной антенной.

Для отыскания источника интенсивных разрядов на линиях высокого напряжения Запорожский филиал ВИЭСХ разработал и проверил в производственных условиях специальный искатель дефектных изоляторов [31], который обладает избирательной чувствительностью к колебаниям, возникающим в ЛЭП при наличии дефектного изолятора. Этот искатель нечувствителен к помехам от нормальных изоляторов и другим видам помех, поэтому поиск источника интенсивных разрядов значительно облегчается.

* * *

Из приведенных данных следует:

1. Состояние изоляции на некоронирующих линиях высокого напряжения 6, 10, 35 *кв*, а также подстанциях 35/6—10 *кв*, можно контролировать по форме кривой высокочастотного напряжения помех, происходящих от изоляторов.

2. Напряжение помех от изоляторов при их нормальном состоянии представляет периодическое следование соизмеримых по амплитуде всплесков высокочастотного напряжения, имеющих частоту 300 *1/сек*.

3. При наличии дефектного изолятора или другого очага интенсивных разрядов высокочастотное напряжение помех имеет форму периодических всплесков с частотой 50 *1/сек* во время начальной стадии разрядов и 100 *1/сек* при завершающей стадии развития дефекта.

4. Периодический контроль состояния изоляции на подстанциях и линиях можно осуществлять с помощью электронного осциллографа по частоте наблюдаемых на экране наибольших всплесков помех.

5. На подстанциях 35/6—10 *кв* объект с интенсивным источником высокочастотных колебаний определяется методом поочередного кратковременного отключения линий по исчезновению на экране осциллографа помех от мощного источника разрядов.

6. Поиск участка линии с мощным очагом разрядов осуществляется с помощью осциллографа, находящегося на подстанции, методом последовательного отключения ее участков, начиная с дальнего конца.

7. Опора или элемент с мощным источником помех отыскивается методом обхода подозреваемого участка линии с измерителем или искателем помех по наибольшему показанию прибора под опорой или возле элемента линии электропередачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акульшин П. К. и др. Теория связи по проводам М.. Связьиздат, 1940.
2. Аронов Р. Л. Аппроксимирование кривой намагничивания. Электричество, 1948, № 4.
3. Архангельский К. С., Власов А. Н. Индикатор частичных разрядов. Электричество, 1939, № 1.
4. Асеев Б. П. Основы нелинейной радиотехники. М., Связьиздат, 1943.
5. Билан Н. А. Исследование помех в шахтных кабельных низковольтных сетях, используемых для передачи телемеханической информации. Автореферат диссертации, Харьков, 1965.
6. Борчанинов Г. С. Высшие гармоники тока и напряжения на электрических станциях. Электрические станции, 1936, № 2.
7. Будзко И. А. Сельские электрические установки и методы их автоматизации. Автореферат диссертации, 1948, МИМЭСХ.
8. Быховский Я. Л. Телефонная связь по проводам линии высокого напряжения. М., Госэнергоиздат, 1953.
9. Быховский Я. Л. Инструкция по измерениям и расчету высокочастотных параметров линий электропередачи. М., Госэнергоиздат, 1953.
10. Быховский Я. Л. и др. Расчет высокочастотных каналов по линиям электропередачи. М., Госэнергоиздат, 1957.
11. Быховский Я. Л. Каналы связи энергетических систем и помехи телефонированию. М., Госэнергоиздат, 1959.
12. Волокобинский Ю. М. Влияние воздушных включений на электрическую прочность и потери изоляционных материалов. Т. XXVI. Вып. 3. ЖТФ, 1956.
13. Воробьев А. А. Техника высоких напряжений. М., Госэнергоиздат, 1945.
14. Гольдман С. Гармонический анализ модуляции и шумы. Изд. иностр. лит., 1951.
15. Ефимов А. В. и др. Изоляторы. М., Госэнергоиздат, 1941.
16. Иванченко Е. Я. и др. Исследование помех в шахтных низковольтных сетях и проектирование систем телемеханики и связи.— В сб.: «Новые средства автоматизации для угольной промышленности». Киев, «Техніка», 1964.
17. Ицхоки Я. С. Нелинейная радиотехника. М., «Советское радио», 1955.
18. Кафиева К. Я. Исследование помех от короны на линиях электропередачи. Электричество, 1960, № 12.

19. Костенко М. В. и др. Помехи от трехфазных линий электропередачи на цепи связи.— В сб.: «Каналы связи энергетических систем и помехи телефонированию». М. Госэнергоиздат, 1959.
20. Краснушкин Н. П. Высшие гармонические напряжения на шинах подстанций промышленных предприятий. Электричество, 1940, № 1.
21. Левин Б. Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике. М., «Советское радио», 1957.
22. Мантров М. И. Электрические разряды на поверхности диэлектриков. Электричество, 1940, № 9.
23. Микуцкий Г. В. Исследование импульсных помех в высокочастотных каналах связи по ЛЭП. Электричество. 1961, № 9.
24. Моисеенко-Великий А. Э. Теория распределения потенциала вдоль гирлянды подвесных изоляторов. Вестник теоретической и экспериментальной электротехники, 1928, № 9.
25. Панфилов С. И. Об искажениях, обусловленных нелинейностью характеристики намагничивания трансформатора низкой частоты. Автореферат диссертации. Л., 1942.
26. Сапирштейн В. Э. Помехи высокочастотным каналам по ЛЭП со стороны радиостанций и неисправного силового оборудования. Бюро технической информации ОРГРЭС, М., Госэнергоиздат, 1959.
27. Сарапкин В. В. Помехи от частичных разрядов на изоляторах электрических сетей 0,4—35 *кв*. Электросвязь, 1963, № 4.
28. Сарапкин В. В. Высокочастотные колебания в ЛЭП 6, 10, 35 *кв*, образующиеся от нормальных и дефектных изоляторов. Электричество, 1966, № 9.
29. Сарапкин В. В. Колебания комбинационных частот в линиях высокого напряжения. Электричество, 1966, № 7.
30. Сарапкин В. В. Исследование мешающих высокочастотных колебаний в сельских электрических сетях. Автореферат диссертации, М., 1962.
31. Сарапкин В. В., Хорошилов В. П. Прибор для отыскивания дефектных изоляторов на ЛЭП 6—10, 35 *кв*. Электрические станции, 1966, № 5.
32. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. М., Госэнергоиздат, 1951.
33. Сканави Г. И. Электрическая прочность титанатов металлов при высокочастотном напряжении. Журнал экспериментальной и технической физики. Т. 27, 1954.
34. Смирнов Б. В. Служебная связь по сельским высоковольтным сетям. Сельхозгиз, 1957.
35. Смирнов Б. В., Сарапкин В. В. Исследование высокочастотных помех в сельских электрических сетях. Научные труды. Т. VII. ВИЭСХ, 1960.
36. Смирнов Б. В., Сарапкин В. В. Высшие гармонические и комбинационные составляющие напряжения генераторов электростанций. Электрические станции, 1960, № 6.
37. Смирнов Б. В., Сарапкин В. В. Образование и структура помех в сельских электрических сетях 0,4—35 *кв*. Электросвязь, 1960, № 7.
38. Смирнов Б. В., Ильин А. А. Передача сигналов по распределительным электрическим сетям. Гостехиздат УССР, Киев, 1963.

39. Харкевич А. А. Спектры и анализ. М., Гостехиздат, 1957.
40. Alsleben E. Experimental values of the characteristics determining the behaviour of high voltage power networks at the freguencies used by carrier currents communication circuits. CIGRE, 1958, № 340.
41. Bartenstein R., Bergman A., Menstell L. Messung der Hochfreguenzbeeinflussung durch 380—kv—Anlagen in Schweden. ETZ, 1955. H. 24, S. 857.
42. Cheek R. C., Moynihan J. D. Study of carrierfreguency noise on power lines. Trans. ATEE, 1951, № 51—187, p. 1127—1134; № 51—245, p. 1325—1334.
43. Chevallier A. Contribution to the study of the noise observed at the input and output of a receiver of a carrier current coupling on to a high voltage line. CIGRE, 1958, № 341.
44. Dennhardt A. Über die störfähigkeit von Entladungsvorgängen auf Hochspannungsleitungen im Gebiet hoher Freguenzen. Habilitation, Berlin, 1940.
45. Дick M. Rundfunkstörungen und Hochspannungsisolator. Bulletin des SEV, 1938, Bd, 29.
46. Estorff W., Cron H. Der Hochspannungsisolator als Bremdschiehtproblem. ETZ, 1952, H. 3, S 57—62.
47. Forrest J. S. The characteristics and performance in service of high — voltage percelain insulators. JIEE, 1942, part 11, v. 89, N 07, p. 60—92.
48. Forrest J. S. Interference from power lines. El. Radio World, 1945, v. 9, p. 31—35.
49. Frischman W. Versuchreihe Nr 002/51, Institut für Hochspannungstechnik, TH, Dresden.
50. Frischman W. Die Bedeutung der Fremdschichtfaktoren für den Isolatorenüberschlag. Deutsche Elektrotechnick, 1958, H. 5, s. 166—170.
51. Furkert W. Die Bceinflussung des Rundfunkempflanges durch Hochspannungsisolatoren. ETZ, 1935, 56, S. 449.
52. Gemant A., Philippoff W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator. Zeitserift für technische Physik, 1932, H. 9, S. 425—430.
53. Gilchrest G. I. Die Rundfunkstörhäufigkeit von Isolatoren. ETZ, 56, 1935, s. 460.
54. Grob O. Prinzipialle Anforderungen an Netzkomandoanlagen für extrem tiefe Stenrfreguenzen, Bull. schweiz — elektrotechn Vereins, 1959, 50, N 2, s. 41—47, 111—113.
55. Hochiai M., Uamada T., Mita N., Voshino S. Untersuchung der Rundfunkstörungen in Japan unter besonderen Berucksichtigung der Hoch — Spannungs — Ubertragungsleitungen. CIGRE, 1956, N 0430, Berlin.
56. Jesper P. Calculation of the lever of interference carried both a high voltage line in the event of faults producing flashovers in a chain of insulators. CIGRE. 1958, N 314.
57. Konrad F., Schöne A. Die Ermittelung den Empfangstörungen. ETZ, 1931, s. 697.
58. Konrad F. Empfangstörungen durch Hochspannungsisolatoren und ihre Beseitigung Tel — Fern— Funk—Technik, 1936, H. 12, S. 326.
59. Konrad F. Versuch zur Rundfunkentstörung auf einem begrenzten Abschnitt ETZ, 1937, H. 30, S. 813.

60. K o n r a d F. Funkstörungen und Entstörung. Fortschritte der Hochfreguenztechnik. Band 3, Leipzig. 1954, S. 364—440.
61. K o n r a d F. Zur Kennziechnung der störfähigkeit von Hochspannungs — Freileitungen in Betrieb. El — Wirtschaft, 1938, H 11, S. 291.
62. K o s k e B. Prüfung der Isolation in Hochspannugs — Freileitungen im Betrieb. El — Wirtschaft, 1938, H 11, S. 291.
63. K o s k e B. Prüfung der Isolation von Hochspannungs — Freileitungen und Schaltanlagen im Betrieb, 1951, Essen.
64. K o s k e B. Hochfreguenz — Isolation — Pruftchnik unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung von Hochfreguenzmessmethoden, 1954, Berlin, Technik.
65. L i p p e r t G., P a k o l a W., B a r t l e t t S., F a h r n k o p f C. Radio influence tests in field and Laboratory — 500 kv tests project of the American Cas and Electrie Company. AIEE. Frans, 1951, v. 70, p. 251—269.
66. M e n g e l e B. Untersuchungen an Freileitungs — Isolatoren über den Störeinfluß auf den Rundfunkempfang. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1936, H. 16, S. 181
67. O r n e r I. W. Design features of insulators and transformers Which contribute to radio interference from power lines. IEE, Trans of the South African, 1956, v. 47, part 5, p. 153—178.
68. R o r d e n H. L., G e n s R. S. Radio noise in relation to the desing of high — voltage transmission lines. El. Eng, 1952, v. 71, N 10, p. 873.
69. S c h u m m E. Fernauslösung von Hochspannung — schalten durch Trägerfreguenzsignale. Elektrotechn. Z., 1959, B. 11, N12, s. 471—475.
70. S c h u h l e i n E. Glimmessungen am Hochspannungs — dielektrikum. Elektrotechn Z. A., 1959, 80, N 22, 777—783.
71. S c h w a r z H. Hochfreguenz — Meßverfahren bei der Hochpannungsprüfung von Freileitungsisolatoren. Berlin, 1953.
72. S c h w e i g e r A. Uber Entladungsvorgänge auf Isolatoren. Rosenthal — Mitteilungen, 1925, Berlin.
73. S m i t h - R o s e. High — voltage overhead electrical transmission lines and radio interference. Wireless World, 1929, N 19, S. 476.
74. S m i t h E. A. Funkstörung durch Hochspannungs — leitungen. Franklin — Institut, 1934, 213, N 6, S. 653.
75. T r a c h s e l F. Probleme der steuerung von Schaltanlagen in Elektrizitätswerken, Bull. ASE, 1957, N 23, S. 1046—1054.
76. V i e w e g R. Starkstromtechnische Gesichtspunkte zur Frage der Empfangstörung durch Hochspannungsisolatoren. El. — Wirtschaft. 1935, N 34, S 19.
77. W e n n e r D. Tonfreguenz — Isolations — Pruftechnik unter besonderer Berück — Sichtigung des Zellweger — Systems. Elektrotechnik und Maschinenbau, 1952, Bd, 69, N 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие 3

I. Помехи в линиях высокого напряжения 5

1. Особенности помех 5
2. Факторы, обусловливающие образование частичных разрядов в изоляторах 9
3. Процессы, сопровождающие частичный разряд в отдельном изоляторе 15

II. Помехи от частичных разрядов в изоляторах трехфазной линии высокого напряжения 21

4. Совокупность импульсов, сопровождающих частичные разряды в изоляторах линии 21
5. Экспериментальное исследование импульсов от частичных разрядов в изоляторах 26
6. Спектральная структура составляющих совокупности импульсов от изоляторов трехфазной сети 37
7. Помехи на выходе приемника от изоляторов высоковольтной линии 63
8. Уровень помех от изоляторов и других источников в линиях 0,4—35 *кв* 70
9. Особенности помех от изоляторов и методы их учета в устройствах связи 76

III. Помехи, возникающие в силовых трансформаторах от взаимодействия гармонических составляющих напряжения 79

10. Высшие гармонические напряжения генераторов электростанций 79
11. Образование комбинационных составляющих в простейшем трансформаторе 82
12. Спектр комбинационных составляющих, образующийся в трехфазном трансформаторе 90
13. Комбинационные составляющие в распределительных сетях 92
14. Особенности помех от трансформаторов и методы их учета 99

IV. Помехи от радиопередатчиков в линиях высокого напряжения 100

15. Особенности помех от радиопередатчиков . . . 100
16. Помехи в высоковольтной линии без напряжения 103
17. Постоянство частоты помех от радиопередатчиков и изменение их уровня 107

18. Значимость помех от радиопередатчиков в линиях различного класса напряжения 111
19. Влияние схемы присоединения к линии 112
20. Происхождение помех от радиопередатчиков . . 113
21. Методы учета помех от радиопередатчиков . . . 114
V. Помехи, нарушающие работу высокочастотных каналов, и методы отыскания их источников 115
22. Признаки помех при нормальном состоянии изоляции линии 115
23. Признаки помех при наличии в линии интенсивного источника разрядов 117
24. Методика определения ненормального состояния изоляции и очага интенсивных помех 121
25. Приборы для отыскания источника интенсивных помех 124
Литература 129

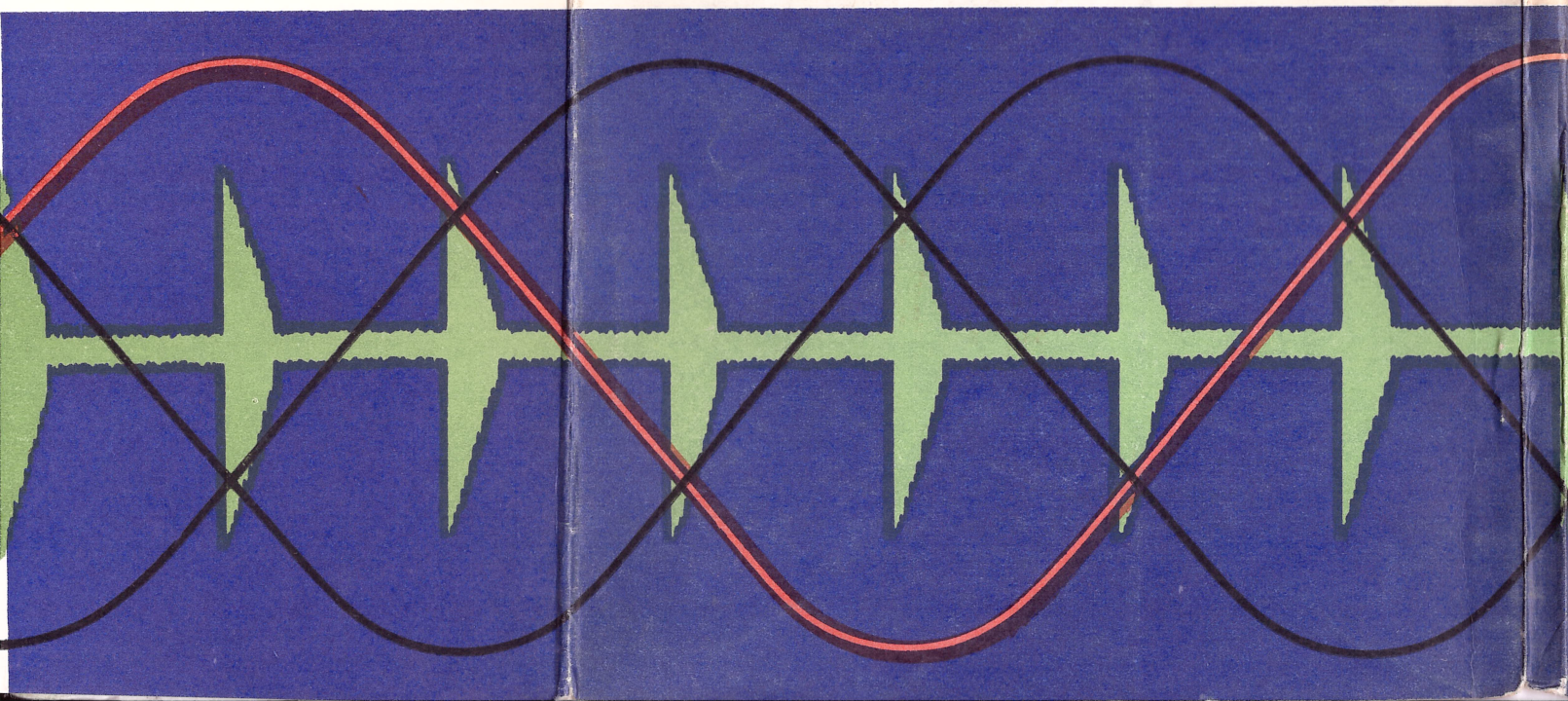
Виктор Васильевич Сарапкин, канд. техн. наук

**ПОМЕХИ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ
ДЛЯ КАНАЛОВ ТЕЛЕФОННОЙ СВЯЗИ
И ТЕЛЕМЕХАНИКИ**

Редакторы издательства инж. *З. В. Божко*, *Т. Г. Трубач*
Переплет художника *Л. Б. Сергия*
Художественный редактор *Б. В. Валуенко*
Технический редактор *В. И. Глазунов*
Корректоры Г. А. Высоцкая, Я. Я. Чигрина

Сдано в набор 23.X.1968 г. Подписано к печати 25. IV. 1969 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Объем: 4,25. физич, листа; 7,1 условн. листа; 7,14 учетно-изд. листа. Тираж 3700. Зак. № 01425, БФ 00325. Цена 49 коп.

Издательство «Техніка», Киев, 4, Пушкинская, 28.

Киевская книжная фабрика № 1 Комитета по печати при Совете Министров УССР, ул. Довженко, 5.

49 коп.